

TRABAJO FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Eléctrica

**ESTUDIOS DE FLUJO ARMÓNICO DE CARGAS EN SISTEMAS
ELÉCTRICOS UTILIZANDO EL PAQUETE INFORMÁTICO
MATPOWER**



Volumen I

Memoria

| | |
|----------------------|------------------------|
| Autor: | Jesús Cinto Martínez |
| Director: | Juan José Mesas García |
| Codirector: | Luis Sainz Sopera |
| Convocatoria: | Junio 2019 |

Resum

La tendència dels darrers anys marca un increment de les càrregues no lineals, que emeten harmònics i provoquen pertorbacions elèctriques a la xarxa. Aquestes càrregues són equips electrònics (equips de control, variadors de velocitat de motors, ordinadors, ...) i les làmpades de descàrrega (LED) que cada dia tenen més presència. La proporció de les càrregues no lineals va augmentant i empitjoren la qualitat del subministrament elèctric, causant també pèrdues econòmiques.

Degut a aquesta problemàtica, cada dia té més pes incorporar aquests tipus de càrregues a l'estudi del flux de potència. En aquest treball es realitza un estudi amb un bus de càrregues no lineals i es resol mitjançant el mètode de la penetració harmònica. Per això s'estudien els fonaments teòrics necessaris per després incorporar al programa MATPOWER els arxius suficients per resoldre un problema d'aquest tipus.

Una vegada s'ha incorporat aquests fitxers, es dona entrada al flux harmònic de càrregues al programa. Obrint així el desenvolupament i l'estudi de més casos amb diferents metodologies per aquests tipus de càrregues.

Resumen

La tendencia de los últimos años marca un incremento de las cargas no lineales, que emiten armónicos y provocan perturbaciones eléctricas a la red. Estas cargas son los equipos electrónicos (equipos de control, variadores de velocidad de motores, ordenadores, ...) y las lámparas de descarga (LED) que cada día tienen más presencia. La proporción de las cargas no lineales va aumentando y empeoran la calidad del suministro eléctrico, causando también pérdidas económicas.

Debido a esta problemática, cada día tiene más peso incorporar este tipo de cargas al estudio de flujo de potencia. En este trabajo se realiza un estudio con un nudo de cargas no lineales y se resuelve mediante el método de la penetración armónica. Para ello se estudian los fundamentos teóricos necesarios para después incorporar en la herramienta MATPOWER los archivos suficientes para resolver un problema de este tipo.

Una vez incorporados estos ficheros, se da entrada al flujo armónico de cargas al programa. Abriendo así el desarrollo y el estudio de más casos con diferentes metodologías para este tipo de cargas.

Abstract

The tendency of recent years shows an increment of the nonlinear loads, these loads emit harmonics and provoke electrical perturbations. The nonlinear loads are the electronic elements (control devices, motor speed variators, computers, ...) and light-emitting diodes (LED) that every day have more weight. The proportion of nonlinear loads is growing and worsen the electrical supply quality, causing as well economic losses.

Consequently, the importance of incorporating these loads on the power-flow study becomes notable every day. This projects focus on analysing a bus of nonlinear loads and it is solved by using the harmonic penetration method. Therefore, a study of the necessary theoretical fundamentals is required in order to incorporate into the MATPOWER software the sufficient files to find a solution to this type of problem.

Once the files are incorporated into the software, harmonic load flow is introduced in the program. This fact boosts the development and analysis of similar cases with different methods for this type of loads.



A mi pareja, amigos y familiares por el apoyo, tanto en la carrera como en el trabajo. También al tutor de este trabajo por la ayuda y la atención empleada. Sin ellos no sería posible.





Índice

| | |
|--|------------|
| RESUM | I |
| RESUMEN | II |
| ABSTRACT | III |
| 1. PREFACIO | 1 |
| 1.1. Origen del trabajo | 1 |
| 1.2. Motivación | 1 |
| 1.3. Requerimientos previos | 2 |
| 2. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 2.1. Objetivos del trabajo | 3 |
| 2.2. Alcance del trabajo | 3 |
| 3. FLUJO DE CARGAS FUNDAMENTAL Y HERRAMIENTAS DE CÁLCULO | 5 |
| 3.1. Flujo de cargas fundamental | 5 |
| 3.1.1. Formulación del flujo de cargas fundamental | 6 |
| 3.1.2. Resolución del flujo de cargas fundamental | 13 |
| 3.2. Herramientas de cálculo | 14 |
| 3.2.1. InterPSS | 14 |
| 3.2.2. MATLAB | 15 |
| 3.2.3. MATPOWER | 15 |
| 4. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA MATPOWER | 17 |
| 4.1. Introducción | 17 |
| 4.2. Modelo de los componentes de un sistema eléctrico de potencia | 17 |
| 4.2.1. Cargas | 17 |
| 4.2.2. Generadores | 18 |
| 4.2.3. Líneas | 18 |
| 4.3. Ecuaciones de la red | 19 |
| 4.4. Métodos numéricos aplicados por MATPOWER para resolver el flujo de cargas fundamental | 20 |
| 4.5. Formatos de intercambio de datos | 22 |
| 4.6. Principales módulos | 24 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 5. | IMPLEMENTACIÓN DE UN CASO DE ESTUDIO DE FLUJO DE CARGAS FUNDAMENTAL | 27 |
| 5.1. | Descripción del caso de estudio | 27 |
| 5.2. | Resolución con InterPSS | 30 |
| 5.3. | Resolución con MATLAB | 32 |
| 5.4. | Resolución con MATPOWER | 34 |
| 5.5. | Comparación de resultados..... | 36 |
| 6. | FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INDICADORES DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN SEÑALES PERIÓDICAS | 39 |
| 6.1. | Valor medio de una señal periódica..... | 39 |
| 6.2. | Valor eficaz de una señal periódica..... | 39 |
| 6.3. | Distorsión de una señal sinusoidal | 39 |
| 6.4. | Indicadores de la distorsión armónica | 41 |
| 6.4.1. | Valor eficaz..... | 41 |
| 6.4.2. | Distorsión armónica individual | 41 |
| 6.4.3. | Espectro armónico | 41 |
| 6.4.4. | Distorsión armónica total | 42 |
| 7. | CARGAS NO LINEALES: FUENTE DE ALIMENTACIÓN MONOFÁSICA | 43 |
| 7.1.1. | Tramo I | 46 |
| 7.1.2. | Tramo II | 46 |
| 7.1.3. | Tramos III y IV..... | 49 |
| 7.1.4. | Determinación de constantes..... | 50 |
| 7.1.5. | Determinación de los tiempos de conmutación | 52 |
| 7.1.6. | Modelo matemático completo..... | 53 |
| 8. | FLUJO ARMÓNICO DE CARGAS Y HERRAMIENTAS DE CÁLCULO | 63 |
| 8.1. | Flujo armónico de cargas..... | 63 |
| 8.1.1. | Formulación del flujo armónico de cargas: penetración armónica | 64 |
| 8.1.2. | Resolución del flujo armónico de cargas: penetración armónica | 66 |
| 8.2. | Herramientas de cálculo..... | 67 |
| 8.2.1. | MATLAB..... | 67 |
| 8.2.2. | MATPOWER | 67 |
| 9. | ADECUACIÓN DE MATPOWER PARA ESTUDIOS DE FLUJO ARMÓNICO DE CARGAS | 69 |

| | |
|---|-----------|
| 10. IMPLEMENTACIÓN DE UN CASO DE ESTUDIO DE FLUJO ARMÓNICO DE CARGAS | 71 |
| 10.1. Descripción del caso de estudio | 71 |
| 10.2. Resolución con MATLAB | 76 |
| 10.3. Resolución con MATPOWER..... | 79 |
| 10.4. Comparación de resultados | 82 |
| 11. ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL | 87 |
| 12. PRESUPUESTO | 89 |
| 13. CONCLUSIONES | 91 |
| 14. BIBLIOGRAFÍA | 93 |

1. Prefacio

1.1. Origen del trabajo

A raíz de la asignatura obligatoria sistemas eléctricos de potencia (SEP) y posteriormente a la asignatura optativa de análisis de sistemas eléctricos de potencia (ASEP), comencé a estudiar y a interesarme por el flujo de cargas y la red eléctrica. Al acabar el curso, estaba satisfecho por el aumento de conocimiento en flujo de cargas lineales. Por otro lado, comencé a interesarme por el flujo de cargas armónico, las perturbaciones y la afectación de este tipo de cargas en la red. Esta motivación me llevó a hablar con el director del proyecto, Juan José Mesas, el cual me propuso utilizar una extensión de MATLAB para este tipo de ejercicios y añadir un módulo para este tipo de cargas hasta ahora inexistente para la comunidad científica y la enseñanza.

1.2. Motivación

La realización y elección de este proyecto se puede dividir en tres factores.

La primera es el paso natural a la continuación de las asignaturas nombradas en el apartado anterior. Tras finalizar los créditos correspondientes, quería realizar un trabajo de final de grado relacionado con las asignaturas. Comunicué al profesor Juan José Mesas mi idea de continuar mi formación de este campo y realizar un trabajo que continúe con la trayectoria educativa. También el buen entendimiento tanto en sesiones teóricas como prácticas con el profesor Mesas en sus clases me animó a comunicarle mi intención de que fuera mi tutor para el trabajo de final de grado.

La segunda fue el querer saber más sobre las cargas no lineales. Como ya he dicho anteriormente, las asignaturas profundizan mucho más en las cargas lineales. Se enseña teoría y práctica de ellas. Anteriormente, se podía considerar que las cargas lineales representaban un 70% de la potencia total y el 30% serían cargas no lineales. Con el paso del tiempo, el uso de iluminación LED y la mayor presencia de electrónica en los aparatos eléctricos ha producido un intercambio en la balanza y hoy en día se encuentra más demanda de potencia de las cargas no lineales. Éstas insertan armónicos a la red, lo cual la contamina y reduce la calidad del suministro eléctrico. Esta preocupación por las compañías y el desconocimiento de la problemática, me ayudó a la hora de escoger y trabajar en este proyecto.

La tercera y última motivación fue utilizar la extensión MATPOWER de MATLAB y añadir un módulo para cargas no lineales, hasta ahora inexistente. En la asignatura ASEP aprendí a programar con MATLAB un tipo de distribución de cargas concreto. MATPOWER facilita este paso, y ayuda mucho al

aprendizaje y la investigación. Es muy accesible, ya que es una extensión de un programa muy conocido y el módulo es gratuito y de libre uso. Al igual que durante el transcurso del trabajo he podido trabajar y aprender con los ejemplos creados por la comunidad científica, la idea de realizar un módulo para ayudar a los demás con un tipo de cargas cada vez más presentes y preocupantes, me motivó desde el primer minuto.

1.3. Requerimientos previos

La realización del trabajo supone unos requerimientos previos:

- Cursar la asignatura obligatoria de SEP y la optativa de ASEP. Todo que la primera es de obligado cumplimiento, la segunda es una optativa en mi plan de estudios. Esta última es la más esencial. Todo que en la primera parte se da inicio al flujo de cargas, es en la asignatura de ASEP donde se profundiza este campo con cargas lineales, se calcula con diferentes metodologías matemáticas y se programa con Matlab® la resolución de un ejercicio.
- Conocimiento de MATLAB y el uso de sus herramientas y códigos. Todo que es inabarcable el saber todo sobre este programa matemático, si se requiere un mínimo de conocimiento y soltura con el programa. Saber códigos básicos y el funcionamiento del programa, facilita luego la creación y programación de módulos con este programa.

2. Introducción

2.1. Objetivos del trabajo

La finalidad de este trabajo es la creación de un módulo en MATPOWER para el cálculo de flujo armónico de cargas mediante el método numérico de la penetración armónica. Como se ha comentado anteriormente, el incremento de las cargas no lineales que emiten armónicos a la red ha hecho más importante analizar y calcular el rendimiento de una red eléctrica con dichas cargas.

Por ello, en el trabajo se va escalando partiendo de los conocimientos adquiridos en clase con la resolución de problemas con flujos de cargas fundamentales a resolverlos con armónicos mediante la herramienta MATPOWER. Cada nuevo objetivo se analiza y se estudia hasta ser resuelto y así pasar al siguiente, alcanzando finalmente un número de ficheros que nos resolverá en la nueva herramienta un ejercicio con cargas no lineales en uno de los nudos.

2.2. Alcance del trabajo

El primer paso de este trabajo es comprender y utilizar la herramienta de MATPOWER. Así como su funcionamiento teórico y uso práctico. Para ello, se resuelve un caso práctico de flujo de cargas fundamental en varias herramientas de cálculo, entre ellas MATPOWER. Con este ejercicio trataremos de comparar los resultados de las distintas herramientas de cálculo para poder ver las ventajas que obtenemos y si son unos resultados aceptables.

El segundo es recopilar y estudiar los fundamentos teóricos para los flujos armónicos de cargas. Para ello, se recopila información de las señales sinusoidales, de los armónicos, de las cargas no lineales, como también de la descomposición armónica de la señal mediante Fourier.

El tercer y último es realizar la finalidad del trabajo, la creación del módulo en MATPOWER. Con los conceptos teóricos adquiridos, se crea en MATLAB la resolución de un caso práctico mediante el método de la penetración armónica. Una vez tengamos los ficheros necesarios para resolver dicho caso, se adecua estos a la extensión MATPOWER para resolverlo mediante la extensión y así incorporar un caso armónico.

Una vez incorporado este módulo a la herramienta de MATPOWER, este trabajo podría abrir paso a más casos resueltos con el método de la penetración armónica y también la creación de nuevos módulos con otros métodos diferentes para la resolución de flujos armónicos de cargas.

3. Flujo de cargas fundamental y herramientas de cálculo

3.1. Flujo de cargas fundamental

En el día a día, hacemos de uso de aparatos electrónicos o maquinas eléctricas que consumen la energía eléctrica que se genera en las centrales. Para transportar la energía eléctrica de los generadores a la demanda, se utilizan las redes eléctricas y de distribución. Para ello, se crea el sistema eléctrico de potencia (SEP) el cual contempla el conjunto instalaciones y aparatos cuyo objetivo es el de generar, transportar y distribuir la energía eléctrica con un equilibrio entre demanda y generación. El flujo de cargas fundamental en redes eléctricas se basa en el estudio del funcionamiento y las interacciones de sus componentes y determinar la potencia que debe suministrar cada unidad generadora para atender a las necesidades de la demanda de potencia en cada uno de los puntos.

Los componentes básicos son generadores, transporte, distribución y cargas. Una vez tenemos la estructura de la red y las características de los componentes, se determina el reparto de carga entre los generadores para atender la demanda total de la potencia en la red. También, se determina la tensión en los diferentes buses y el rendimiento de la red.

Los generadores son los elementos que se encargan de producir la energía eléctrica necesaria para satisfacer la demanda. La producción de dicha energía se consigue mediante la transformación de energía primaria (como las nucleares o las renovables) a energía eléctrica.

El transporte de la electricidad se divide en dos partes, la parte de transporte y la parte de distribución, y unen los generadores con los consumidores. Este transporte se genera normalmente en corriente alterna, aunque existen nuevas formas de transporte en corriente continua, ya que la relación potencia/distancia es mayor, no tienen pérdidas por efectos inductivos ni inestabilidades, en contra, el coste fijo es más alto y la complejidad de los sistemas. Al inicio y al final del transporte, se usan transformadores para elevar o disminuir el voltaje, al inicio y al final respectivamente. Al subir el voltaje por relación se disminuye la intensidad. Esto causa que las pérdidas sean menores y la sección del cableado también se ve disminuida.

No obstante, no solo se debe suministrar la potencia a los diferentes puntos de demanda, también se debe asegurar ciertas condiciones para tener una buena calidad de servicio. La calidad del suministro eléctrico mide si la forma de onda de las tensiones que proporcionan las compañías suministradoras al usuario está dentro de los márgenes establecidos. En un hipotético caso en el cual la calidad de potencia es ideal, contemplaríamos senoides perfectas de tensión y corriente, ambas en de frecuencia

constante y de amplitud también constante. Como esto no es la realidad, se establecen unas normas para que el usuario obtenga una alimentación de calidad.

Contemplando la relación suministro-calidad, se ejecuta el estudio de flujo de cargas fundamental más óptimo para cada red. En este estudio se debe tener en cuenta:

- El reparto de cargas entre las diferentes unidades generadores tiene un número elevado de combinaciones entre ellas para satisfacer la demanda eléctrica.
- Las potencias que pueden generar, transformar y transportar los componentes de una red están limitadas.
- Las tensiones en los buses deben estar dentro de un margen.

El estudio completo de dicho flujo de cargas está dividido en tres pasos esenciales:

1. Formulación. Se escoge un modelo matemático que describa las relaciones entre tensiones y potencias en la red que estamos estudiando.
2. Resolución numérica de las ecuaciones que permiten determinar las tensiones en los buses, se usan métodos numéricos como por ejemplo el método de Newton-Raphson o el de Gauss-Seidel.
3. Cálculo de potencia suministrada por los generadores, flujo de potencia en cada componente y rendimiento de la red.

Para ello, se estimulan una serie de hipótesis de partida para la resolución del flujo. Las leyes y principios de la corriente alterna se consideran las tensiones y corrientes en régimen sinusoidal permanente y misma frecuencia para facilitar el cálculo. En el caso que en el circuito las cargas sean resistivas, inductivas, capacitivas y sus combinaciones pueden considerarse lineales y equilibradas. Los generadores suministran a la red tensión trifásica simétrica y equilibrada de secuencia directa.

Se representa la red como una red pasiva vista desde sus puntos de acceso (representación multipuerta) para el estudio de la red sea cual sea la extensión de la misma.

3.1.1. Formulación del flujo de cargas fundamental

Los puntos de acceso de la red se denominan nudo o bus. A cada uno de ellos se le asignan 6 variables:

- Módulo de la tensión V_i
- Argumento de la tensión δ_i
- Potencia activa generada P_{Gi}
- Potencia reactiva generada Q_{Gi}
- Potencia activa demandada P_{Di}

- Potencia reactiva demandada Q_{Di}
- Potencia inyectada activa de bus $P_{Gi} - P_{Di}$
- Potencia inyectada reactiva de bus $Q_{Gi} - Q_{Di}$

De este grupo de variables asignadas a cada bus, se pueden hacer tres distinciones:

- Variables de control, son aquellas sobre las que se pueden y se tienen el total control. Estas variables son tanto la potencia activa y reactiva generada y la tensión en ciertas unidades generadoras.
- Variables no controlables, son aquellas cuyo valor viene fijado por los usuarios o consumidores. Estas son tanto la potencia activa como la reactiva demandada.
- Variables de estado, son aquellas variables que permiten calcular el estado de la red. Estas son las tensiones de cada bus, con módulo y argumento.

Se denomina red pasiva a lo que queda de la red cuando no se incluye ni la generación ni el consumo. Se consideran entonces, líneas aéreas y transformadores. Los componentes de la red pasiva se modelizan de la siguiente manera:

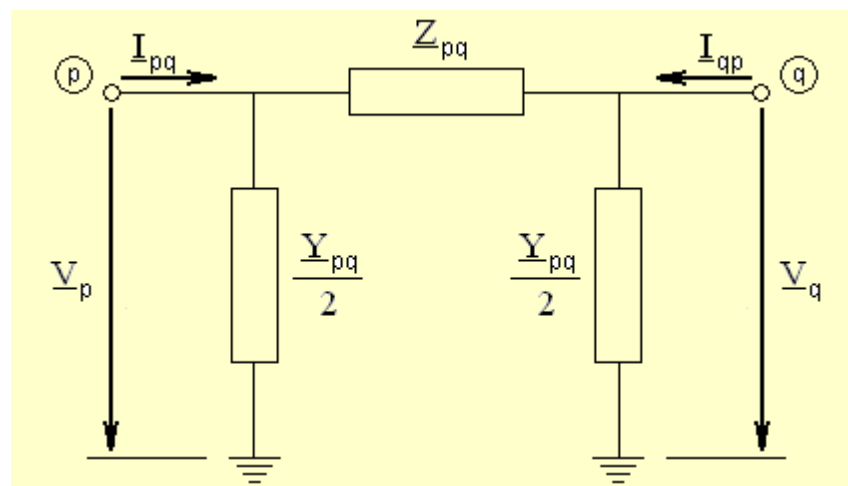


Figura 3.1 Modelización de componentes de la red pasiva [7]

Se crea una matriz que relaciona el vector de tensiones de bus con el vector de intensidades de bus. Esta matriz recibe el nombre de matriz de admitancias de bus.

$$Y_{bus} \cdot V_{bus} = I_{bus}$$

Ec. 3.1

La matriz de admitancias de bus (Y_{bus}) es una matriz simétrica, a menos que existan transformadores con desfase regulable y singular si no tiene conexión a tierra. Para calcular la matriz de admitancias tenemos dos formas distintas, aunque para redes de tamaño pequeño se suele usar:

$$Y_{bus} = [Y_{ij}] \in M_{n \times n}(C)$$

Ec. 3.2

Siendo:

- $Y_{ii} = \sum$ Admitancias de rama conectadas al bus i
- $Y_{ij} = \sum$ Admitancias de rama conectadas entre los buses i y j ($i \neq j$)

Como ya hemos mencionado anteriormente, en cada bus de una red de n buses se tiene la relación de la intensidad con la tensión mediante la matriz de admitancias. También, podemos relacionar entre las variables asignadas, las potencias de los buses.

$$P_i + j \cdot Q_i = S_i = \underline{V}_i \cdot \underline{I}_i^*$$

Ec. 3.3

Sustituyendo la Ec. 3.1 en la Ec. 3.3, se obtienen las ecuaciones complejas de potencia de bus:

$$P_i + j \cdot Q_i = \underline{V}_i \cdot \left(\sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k \right)^*$$

Ec. 3.4

Si simplificamos y trabajamos con la expresión compleja anterior, de la descomposición en dos ecuaciones reales obtenemos las ecuaciones reales de potencia de bus:

$$P_i = V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \cdot \sen(\delta_i - \delta_k))$$

Ec. 3.5

$$Q_i = V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \sen(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k))$$

Ec. 3.6

Las ecuaciones reales de potencia vistas, asociadas a los n buses conforman un sistema de ecuaciones de $2n$ ecuaciones. Eso supone un problema, ya que nos encontramos con $4n$ incógnitas. En otras palabras, tenemos 4 variables incógnita asignadas a cada bus. Estas son la tensión, módulo y argumento, potencia activa y potencia reactiva del bus. Por ello, se ha de especificar inicialmente el valor de $2n$ de esas variables incógnita para que se pueda resolver dicho sistema. Para ello, clasificaremos los diferentes buses en tres tipos.

- Slack o de referencia. De los buses que tengamos en nuestro flujo de potencia, escogeremos uno de ellos el cual conozcamos la tensión del mismo. El módulo de la tensión se mantiene, y el argumento, al ser la referencia de los demás buses, será de 0º y como incógnita, la potencia activa y reactiva.
- PV. Es el bus el cual conocemos el módulo de la tensión y la potencia activa y como incógnita, tenemos el argumento y de la tensión y la potencia reactiva.
- PQ. Es aquel bus el cual conocemos la potencia tanto activa como reactiva y de incógnitas tenemos el módulo y el argumento de la tensión.

En el bus Slack ($i=1$), la determinación de la potencia suministrada por su unidad generadora es la siguiente:

$$\underline{S}_i = \underline{V}_i \cdot \left(\sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k \right)^* \rightarrow \underline{S}_{Gi} = \underline{S}_i + \underline{S}_{Di}$$

Ec. 3.7

$$P_i = V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\delta_{ik}) + B_{ik} \cdot \sin(\delta_{ik})) \rightarrow P_{Gi} = P_i + P_{Di}$$

Ec. 3.8

$$Q_i = V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin(\delta_{ik}) - B_{ik} \cdot \cos(\delta_{ik})) \rightarrow Q_{Gi} = Q_i + Q_{Di}$$

Ec. 3.9

En los nudos PV ($i=2, \dots, r+1$) la potencia suministrada por cada unidad generadora es:

$$Q_i = \text{Im} \left\{ \underline{V}_i \cdot \left(\sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k \right)^* \right\} \rightarrow Q_{Gi} = Q_i + Q_{Di}$$

Ec. 3.10

$$Q_i = V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin(\delta_{ik}) - B_{ik} \cdot \cos(\delta_{ik})) \rightarrow Q_{Gi} = Q_i + Q_{Di}$$

Ec. 3.11

En un flujo de cargas de n buses, la Tabla 1 nos muestra los datos y las incógnitas del problema a resolver, planteando un sistema de ecuaciones según las condiciones de la red.

| Buses | Datos | Incógnitas del sistema | Datos | Núm. de incógnitas del sistema |
|---------------------------------|-----------------|------------------------|-----------|--------------------------------|
| 1 (Slack) $i=1$ | V_i, δ_i | P_i, Q_i | 2·1 | 2·1 |
| r (PV) $i=2, \dots, r+1$ | P_i, V_i | Q_i, δ_i | 2·r | 2·r |
| n-r-1 (PQ) $i=r+2, \dots, n$ | P_i, Q_i | V_i, δ_i | 2·(n-r-1) | 2·(n-r-1) |

Tabla 1 Datos e incógnitas del flujo de cargas. Fuente [7]

El sistema de $2n$ ecuaciones tiene ahora $2n$ incógnitas por tener sólo 2 variables incógnita asignadas a cada bus. Para reducir el número de ecuaciones e incógnitas del sistema, se excluye del mismo toda ecuación en la que una incógnita aparezca sólo en esa ecuación y en ninguna otra del sistema. Así, por cada ecuación excluida se elimina en consecuencia una incógnita. De esta manera se reduce el número de ecuaciones e incógnitas del sistema, facilitándose su resolución por parte del ordenador.

Antes de la reducción, las ecuaciones reales de potencia de bus asociada a los n buses conforman el siguiente sistema de $2n$ ecuaciones con $2n$ incógnitas:

$$P_i - V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k)) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Ec. 3.12

$$Q_i - V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k)) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Ec. 3.13

Para efectuar la reducción, las ecuaciones en las que una incógnita aparezca sólo en esa ecuación y en ninguna otra del sistema son eliminadas del mismo. Dichas ecuaciones son las siguientes:

$$P_i - V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k)) = 0 \quad i = 1$$

Ec. 3.14

$$Q_i - V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k)) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, r+1$$

Ec. 3.15

Quedando el siguiente sistema reducido de $2n - r - 2$ ecuaciones:

$$P_i - V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k)) = 0 \quad i = 2, \dots, n$$

Ec. 3.16

$$Q_i - V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k)) = 0 \quad i = r+2, \dots, n$$

Ec. 3.17

El cual tiene un total de $2n - r - 2$ incógnitas tal como se puede deducir a partir de la siguiente tabla:

| Buses | Datos | Incógnitas del sistema | Datos | Núm. de incógnitas del sistema |
|-----------------------------------|-----------------|------------------------|---------------|--------------------------------|
| 1 (Slack) $i=1$ | V_i, δ_i | \emptyset | 2·1 | 0·1 |
| r (PV) $i=2, \dots, r+1$ | P_i, V_i | δ_i | 2· r | 1· r |
| $n-r-1$ (PQ) $i=r+2, \dots, n$ | P_i, Q_i | V_i, δ_i | 2·($n-r-1$) | 2·($n-r-1$) |

Tabla 2 Datos e incógnitas del flujo de cargas tras la reducción. Fuente [7]

Si en lugar de con las ecuaciones reales de potencia de bus trabajamos con las ecuaciones complejas de potencia de bus, tras la clasificación de buses, las ecuaciones complejas de potencia de bus asociadas a los n buses conforman el siguiente sistema de $n+r$ ecuaciones:

$$(P_i + j \cdot Q_i) - \underline{V}_i \cdot \left(\sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k \right)^* = 0 \quad i = 1$$

Ec. 3.18

$$P_i - \operatorname{Re} \left\{ \underline{V}_i \cdot \left(\sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k \right)^* \right\} = 0 \quad i = 2, \dots, r+1$$

Ec. 3.19

$$Q_i - \operatorname{Im} \left\{ \underline{V}_i \cdot \left(\sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k \right)^* \right\} = 0 \quad i = 2, \dots, r+1$$

Ec. 3.20

$$(P_i + j \cdot Q_i) - \underline{V}_i \cdot \left(\sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k \right)^* = 0 \quad i = r+2, \dots, n$$

Ec. 3.21

Este sistema de $n+r$ ecuaciones tiene $n+r$ incógnitas. Para reducir el número de ecuaciones e incógnitas del sistema, se excluyen del mismo las ecuaciones Ec. 3.18 y Ec. 3.20 (por ser ecuaciones en las que una incógnita aparece sólo en esa ecuación y en ninguna otra del sistema) obteniendo así un sistema reducido de $n-1$ ecuaciones:

$$P_i - \operatorname{Re} \left\{ \underline{V}_i \cdot \left(\sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k \right)^* \right\} = 0 \quad i = 2, \dots, r+1$$

Ec. 3.22

$$(P_i + j \cdot Q_i) - \underline{V}_i \cdot \left(\sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k \right)^* = 0 \quad i = r+2, \dots, n$$

Ec. 3.23

El cual tiene un total de $n-1$ incógnitas tal como se puede deducir a partir de la siguiente tabla:

| Buses | Datos | Incógnitas del sistema | Datos | Núm. de incógnitas del sistema |
|-----------------------------------|-----------------|------------------------|-------------------|--------------------------------|
| 1 (Slack) $i=1$ | V_i, δ_i | \emptyset | 1·1 | 0·1 |
| r (PV) $i=2, \dots, r+1$ | P_i, V_i | δ_i | $2 \cdot r$ | $1 \cdot r$ |
| $n-r-1$ (PQ) $i=r+2, \dots, n$ | P_i, Q_i | V_i, δ_i | $1 \cdot (n-r-1)$ | $1 \cdot (n-r-1)$ |

Tabla 3 Datos e incógnitas del flujo de cargas tras la reducción. Fuente [7]

3.1.2. Resolución del flujo de cargas fundamental

El proceso de resolución del flujo de cargas en redes eléctricas puede resumirse en 4 pasos.

1. Clasificación de los buses de la red (Slack, PV, PQ). A partir de los datos y las incógnitas de cada bus, clasificamos cada uno de ellos.
2. Cálculo de la matriz de admitancias de bus. A partir de los datos de la red eléctrica, sus parámetros y la estructura de conexión.
3. Determinación de las tensiones (módulo y argumento) mediante resolución numérica del sistema reducido formado por las ecuaciones de potencia de bus.
4. Flujos de potencia y rendimiento. Una vez conocemos la tensión de cada uno de los buses, calculamos los flujos de potencia de cada componente de la red y obtenemos el rendimiento de la red.

Los flujos de potencia de cada componente de la red se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\underline{S}_{pq} = \underline{V}_p \cdot \underline{I}_{pq}^* = \underline{V}_p \cdot \left(\frac{\underline{V}_p - \underline{V}_q}{\underline{Z}_{pq}} + \frac{\underline{Y}_{pq}}{2} \cdot \underline{V}_p \right)^* ; \underline{S}_{qp} = \underline{V}_q \cdot \underline{I}_{qp}^* = \underline{V}_q \cdot \left(\frac{\underline{V}_q - \underline{V}_p}{\underline{Z}_{pq}} + \frac{\underline{Y}_{pq}}{2} \cdot \underline{V}_q \right)^*$$

Ec. 3.24

El rendimiento de la red se calcula teniendo en cuenta las potencias activas no nulas inyectadas en los buses:

$$\eta(\%) = \frac{\sum_{i/P_i < 0} |P_i|}{\sum_{i/P_i > 0} P_i} \cdot 100$$

Ec. 3.25

Para el cálculo de las tensiones de bus, las ecuaciones de potencia de bus del sistema reducido que se pretenden resolver son ecuaciones algebraicas no lineales. Para ello, la solución de dicho sistema debe obtenerse con un método numérico iterativo. Los tres métodos iterativos más comunes y que se han estudiado son el método de Gauss-Seidel, método de Newton-Raphson y el método desacoplado rápido.

Independientemente del método numérico que se emplee, es necesario hacer una estimación inicial de la tensión en todos los buses de la red, excepto en el bus Slack o de referencia el cual, como ya hemos mencionado anteriormente, se conoce el módulo y el argumento es 0°. En los buses PV solo estimaremos el valor del argumento y en los buses PQ tanto el módulo como el argumento. Esta estimación inicial se emplea para obtener una nueva aproximación del resultado final y de forma iterativa hasta que la diferencia entre dos aproximaciones consecutivas sea inferior a la precisión fijada y tengamos un resultado que consideremos correcto.

3.2. Herramientas de cálculo

El cálculo del flujo de potencia puede llegar a ser largo y laborioso. En un sistema de pocos buses, se puede calcular con más o menos dificultad. En cambio, para un número más elevado de puede llevar muchas horas de trabajo. Para ello, se utilizan programas de cálculo matemático que facilitan el proceso de resolución y limitan el error de ellos. A continuación, se muestran las herramientas de cálculo que se incluyen en este trabajo.

3.2.1. InterPSS

InterPSS es un programa de libre distribución y código abierto que resuelve flujos de cargas de potencia [4]. La simulación es la parte más diferencial de este programa, ya que el sistema recoge un diseño y un análisis amplio y visual. Satisface la necesidad de un sistema moderno y potente, pero con unas normas muy marcadas.

La característica más relevante es la arquitectura del programa abierta y ligera, la cual permite que los componentes desarrollados por otros se puedan conectar fácilmente a InterPSS para aumentar su funcionalidad y permitir que sus componentes se integren en el software.

Actualmente, tiene implementado el flujo de carga de corriente alterna y de corriente continua, cortocircuito, estabilidad transitoria, análisis del sistema de distribución y DC-OPF (Optimal Power Flow) y otros módulos de diseño, análisis y simulación de sistemas energía en el futuro.

3.2.2. MATLAB

MATLAB es un programa de software matemático de altas prestaciones que, mediante un lenguaje de programación propio más sencillo que el tradicional, resuelve los problemas planteados[6]. Esta herramienta de cálculo no es gratuita como el programa mencionado anteriormente, pero tanto de manera educativa como profesional, es muy popular. Es popular por su programación, por sus funciones y cálculos con matrices y vectores, velocidad en los tiempos de ejecución con robustas librerías matemáticas y una gran cantidad de usuarios y desarrolladores, con una gran comunidad y ayudas.

MATLAB no es un programa tan visual como InterPSS, pero una vez se tiene la programación general, es más cómodo y rápido resolver distintos flujos de cargas. También resulta más cómodo para aquellos que estén familiarizados con el programa y su lenguaje y quieran resolver un flujo de cargas. El gran problema es la introducción de un método iterativo para resolver el flujo de cargas y adecuar bien los datos a este.

3.2.3. MATPOWER

MATPOWER es una extensión de MATLAB para resolver y optimizar flujos de cargas desarrollada inicialmente por Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murrillo Sánchez y Deqiang Gan [14]. Está pensado para ser una herramienta de simulación de flujo de cargas para estudiantes e investigadores, ya que es de fácil uso y se puede descargar gratuitamente desde su página web oficial. Dicho paquete mantiene una estructura y un código simple para ser fácilmente modificable y resolver así los flujos de potencia. Resulta muy valioso, ya que dispone en su biblioteca con un número elevado de casos de muy fácil uso y modificables.

4. Descripción de la herramienta MATPOWER

4.1. Introducción

MATPOWER supone una facilidad de programación y obtención de resultados mucho mayor respecto a la programación con MATLAB, pero la extensión se rige por unas normas que se deben conocer. Para ello, se dispone en la página web de un manual y cuentan con numerosos ejemplos de flujos de cargas, con las referencias del ejemplo especificadas al inicio del mismo.

El método de cálculo predeterminado es el método de Newton-Rapshon y se basa en tres datos de entrada:

- Cargas
- Generadores
- Líneas

En este trabajo, se harán uso de los tres principales inputs del programa y la compararemos con las otras herramientas de cálculo.

A partir de un caso tipo, el procedimiento de cálculo más habitual es sustituir los datos ya almacenados por los del sistema el cual queremos obtener los resultados del flujo de potencia. Luego, hay un listado de comandos para visualizar los resultados obtenidos del flujo de cargas.

4.2. Modelo de los componentes de un sistema eléctrico de potencia

MATPOWER emplea todos los modelos estándar que se utilizan normalmente para el análisis del flujo de potencia. Debido a la fortaleza del lenguaje de programación de MATLAB con el manejo de las matrices y los vectores, los modelos y las ecuaciones se presentan en forma de matriz y vector. Internamente, las magnitudes de los valores se expresan en unidades y los ángulos y todos los generadores y sucursales fuera de línea se eliminan antes de formar los modelos utilizados para resolver el flujo de potencia. Todos los buses se enumeran consecutivamente, comenzando por el 1, y los generadores se reordenan por el número de bus y las líneas se enumeran por la conexión entre los buses.

4.2.1. Cargas

Las cargas son la demanda de los buses y las que absorben la energía generada del sistema. Están modeladas en de potencia activa y reactiva para cada bus.



$$S_d^i = P_d^i + j \cdot Q_d^i$$

Ec. 4.1

Siendo $S_d = P_d + jQ_d$ el vector de $n_b \times 1$ de las cargas de todos los buses.

4.2.2. Generadores

Los generadores son los buses que inyectan energía al sistema del flujo de cargas y satisfacen la demanda. Un generador se modela con la inyección de potencia aparente para cada bus que haya un elemento generador de energía. Para cada generador i , la inyección es:

$$S_g^i = P_g^i + j \cdot Q_g^i$$

Ec. 4.2

Sea $S_g = P_g + jQ_g$ el vector de $n_g \times 1$ de las inyecciones del generador. El vector $n_b \times 1$ de todas las inyecciones de bus de los generadores se expresa de la siguiente manera:

$$S_{g,bus} = C_g \cdot S_g$$

Ec. 4.3

Siendo C_g la matriz que se define mediante el elemento $(i; j)$ siendo 1 si el generador j está situado en bus i y 0 en el caso contrario.

4.2.3. Líneas

Las líneas son el medio de transmisión de la potencia entre los diferentes buses. Todas las líneas de transmisión y transformadores se modelan como un modelo de línea común, consistiendo en un modelo de transmisión estándar con una impedancia en serie $Z_s = r_s + jx_s$ y una susceptancia total b_c que deben ser especificados por el usuario. En serie de los elementos, se conecta un transformador ideal de cambio de fase.

Con la admitancia en serie en el modelo π con $y_s = 1/Z_s$, la admitancia de la línea se puede representar en la siguiente figura:

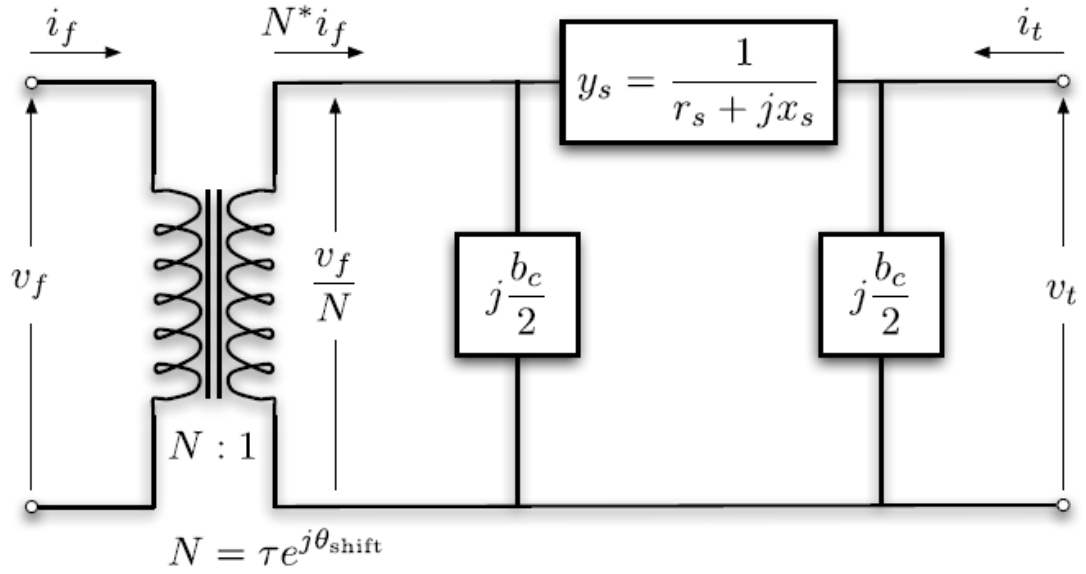


Figura 4.1. Esquema π de la modelización de una línea en MATPOWER [13]

Las inyecciones de corriente en el inicio y final de las ramas son expresadas en términos de una matriz de admitancia de rama (Y_{br}) con la impedancia serie del modelo π la cual se estructura de la siguiente forma:

$$[Y_{br}] = \begin{bmatrix} \left(y_s + j\frac{b_c}{2}\right)\frac{1}{\tau^2} & -y_s\frac{1}{\tau e^{-j\theta_{shift}}} \\ y_s\frac{1}{\tau e^{-j\theta_{shift}}} & y_s + j\frac{b_c}{2} \end{bmatrix}$$

Los parámetros serán especificados en las columnas del fichero de MATPOWER.

4.3. Ecuaciones de la red

Para una red con n_b buses, todos los elementos de impedancia del modelo son incorporados en una matriz $n_b \times n_b$ compleja, en la matriz Y_{bus} de admitancias que relaciona la corriente de cada nudo con el voltaje:

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V$$

Ec. 4.4

Similarmente, para una red con n_l líneas, el sistema de admitancias de la rama $n_l \times n_b$, $Y_f(\text{from})$ e $Y_t(\text{to})$ relacionan los voltajes de los nudos con los vectores $n_l \times 1$ vector I_f y I_t con las corrientes de rama desde y hasta el final de todas las ramas, respectivamente:

$$I_f = Y_f \cdot V$$

Ec. 4.5

$$I_t = Y_t \cdot V$$

Ec. 4.6

Las corrientes inyectadas de I_{bus} e I_t , se pueden usar para calcular las potencias inyectadas:

$$S_{bus}(V) = [V] \cdot I_{bus}^* = [V] \cdot Y_{bus}^* \cdot V^*$$

Ec. 4.7

$$S_f(V) = [C_f V] \cdot I_f^* = [C_f V] \cdot Y_f^* \cdot V^*$$

Ec. 4.8

$$S_t(V) = [C_t V] \cdot I_t^* = [C_t V] \cdot Y_t^* \cdot V^*$$

Ec. 4.9

Siendo C_f y C_t matrices que se definen de la siguiente manera. El elemento $(i; j)$ define a C_f y C_t se define mediante el elemento $(i; k)$ y son igual a 1 para cada rama i , donde la rama i se conecta del bus j al bus k . El resto de los elementos de C_f y C_t serán cero.

La función compleja de los voltajes y las potencias inyectadas se recopilan en una matriz con la siguiente forma:

$$g_s(V, S_g) = S_{bus}(V) + S_d - C_g S_g = 0$$

Ec. 4.10

4.4. Métodos numéricos aplicados por MATPOWER para resolver el flujo de cargas fundamental

El flujo de cargas standard resuelve el conjunto de voltajes para cada bus y el flujo de potencias de las cargas a través de las líneas. MATPOWER incluye programas para resolver flujos de potencia de AC y DC. Ambos, implican resolver un conjunto de ecuaciones sin conocer los voltajes de los nudos.

Todos los programas de MATPOWER se centran en los problemas del flujo pequeños, a excepción de Gauss-Seidel, el cual funciona bien para sistemas más grandes. Actualmente, ningún ejemplo o caso incluye una actualización automática de transformadores u otras técnicas para restringir el flujo de

potencia óptimas como el generador, el voltaje o las cargas y se han de realizar cambios manualmente. En este caso, se estudiará el flujo de potencia en AC.

En MATPOWER, como en los casos estudiados, se elige un bus de referencia o Slack, para fijar el voltaje y conocer tanto módulo como argumento. Al tener el valor del ángulo del voltaje del bus de referencia, la potencia real generada en el bus Slack se toma como un dato desconocido. Los buses generadores son normalmente clasificados como buses PV, con el valor de la magnitud del voltaje y la potencia activa. Estos se especifican en el programa como V_G y P_G de la matriz, respectivamente. Por lo contrario, los buses no generadores, normalmente se especifican como nudos PQ, el cual conocemos totalmente la potencia activa P_D y la potencia reactiva Q_D demandada. La clasificación de los buses se especifica en la columna BUS_TYPE que el siguiente apartado se explica más detenidamente.

En la formulación tradicional del flujo de potencia en AC, tanto la potencia activa como la reactiva, se escriben en función del módulo y argumento del voltaje del nudo, y las potencias demandadas se asumen como constantes.

$$g_P(\theta, V_m, P_g) = P_{bus}(\theta, V_m) + P_d - C_g P_g = 0$$

Ec. 4.11

$$g_Q(\theta, V_m, Q_g) = Q_{bus}(\theta, V_m) + Q_d - C_g Q_g = 0$$

Ec. 4.12

Para nuestro caso, se genera una función $g(x)$ que se forma mediante las ecuaciones de balance de las potencias reales para todos los nudos que no sean de referencia y las potencias reactivas para todos los nudos PQ. Se añaden los elementos de cargas, ángulos de referencia, las magnitudes de las tensiones y las potencias conocidas de los generadores.

$$g(x) = \begin{bmatrix} g_P^{\{i\}}(\theta, V_m, P_g) \\ g_Q^{\{i\}}(\theta, V_m, Q_g) \end{bmatrix}$$

Ec. 4.13

El vector x consta de las magnitudes de las tensiones de los nudos PQ y de los ángulos en los nudos PQ y PV.

$$x = \begin{bmatrix} \theta^{\{i\}} \\ v_m^{\{j\}} \end{bmatrix}$$

Ec. 4.14

Se generan un sistema de ecuaciones no lineales con $n_{pv} + 2n_{pq}$ ecuaciones e incógnitas, donde n_{pv} el número de buses PV y n_{pq} el número de nudos PQ. Una vez resuelta x , la ecuación de potencia real se puede usar para calcular la potencia real del generador del bus Slack o referencia. Del mismo modo, las ecuaciones de equilibrio de potencia reactiva $n_{pv} + 1$ restantes producen la potencia reactiva del generador.

MATPOWER incluye cuatro algoritmos diferentes para resolver el flujo de potencia en AC. El método predeterminado es el método de Newton-Raphson y de forma iterativa recalcula la función $g(x)$ hasta tener un resultado se considere correcto.

También incluye el método de desacoplamiento rápido en sus dos versiones (XB y BX). Estos dos algoritmos reducen el cómputo por iteración, sin embargo, tienen más iteraciones. El cuarto algoritmo es el método Gauss-Seidel, que tiene numerosas desventajas en relación con el método iterativo de Newton pero que tiene una preparación sencilla, a cambio tiene muchas más iteraciones, que crecen a medida que se aumentan el número de buses de la red a analizar.

4.5. Formatos de intercambio de datos

4.5.1.1. Cargas

Los datos de las cargas se introducen con los siguientes parámetros:

- **bus_i**: Indica el número de bus (número positivo).
- **type**: Indica el tipo de bus, (1 PQ, 2 PV, 3 Slack o bus de Referencia).
- **Pd**: Demanda de potencia activa (MW).
- **Qd**: Demanda de potencia reactiva (MVar).
- **Gs**: Conductancia del shunt (MW demandada en $V=1.0$ p.u.).
- **Bs**: Susceptancia de shunt (MVar inyectada en $V=1.0$ p.u.).
- **area**: número de área (número positivo).
- **Vm**: Magnitud del voltaje (p.u.).
- **Va**: Angulo del voltaje (grados).
- **baseKV**: Voltaje base (kV).
- **zone**: Zona de pérdida (número positivo).
- **Vmax**: Máximo voltaje (p.u.).
- **Vmin**: Mínimo voltaje (p.u.).

A continuación, se muestra un ejemplo de la implementación de estos datos en MATPOWER:

| bus_i | type | Pd | Qd | Gs | Bs | area | Vm | Va | baseKV | zone | Vmax | Vmin |
|-------|------|----|----|----|----|------|------|----|--------|------|------|------|
| 1 | 3 | 40 | 30 | 0 | 0 | 1 | 0.98 | 0 | 11 | 1 | 1.1 | 0.9 |

Tabla 4. Ejemplo de inserción de datos de cargas a MATPOWER

4.5.1.2. Generadores

Los datos de los generadores tienen los siguientes parámetros:

- **bus**: Número de bus (número positivo).
- **Pg**: Generación de potencia activa (MW).
- **Qg**: Generación de potencia reactiva (MVar).
- **Qmax**: Máxima inyección de potencia reactiva (MVar).
- **Qmin**: Mínima inyección de potencia reactiva (MVar).
- **Vg**: Magnitud de voltaje (p.u.).
- **mBase**: Potencia aparente base (MVA).
- **status**: Estado del generador (0 si está fuera de servicio o 1 si está en servicio).
- **Pmax**: Inyección máxima de potencia activa (MW).
- **Pmin**: Inyección mínima de potencia activa (MW).
- **Pc1**: Curva de capacidad baja (MW).
- **Pc2**: Curva de capacidad alta (MW).
- **Qc1min**: Potencia reactiva mínima para el PC1 (MVar).
- **Qc1max**: Potencia reactiva máxima para el PC1 (MVar).
- **Qc2min**: Potencia reactiva mínima para el PC2 (MVar).
- **Qc2max**: Potencia reactiva máxima para el PC2 (MVar).

A continuación, se muestra un ejemplo de la implementación de estos datos en MATPOWER:

| bus | Pg | Qg | Qmax | Qmin | Vg | mBase | status | Pmax | Pmin | Pc1 | Pc2 |
|--------|--------|--------|--------|-------|----|-------|--------|------|------|-----|-----|
| 5 | 130 | 60 | 9999 | -9999 | 1 | 100 | 1 | 9999 | 0 | 0 | 0 |
| Qc1min | Qc1max | Qc2min | Qc2max | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | |

Tabla 5 Ejemplo de inserción de datos de generadores a MATPOWER

4.5.1.3. Líneas

Todas las líneas están modeladas en π , como hemos mencionado en el apartado anterior. Los datos a introducir en MATPOWER son los siguientes:

- **fbus**: A que bus está conectado o bus de inicio (*from*)
- **tbus**: El bus al que se conecta la rama o bus final (*to*)
- **r**: Valor de la resistencia (p.u).
- **x**: Valor de la reactancia (p.u).
- **b**: Valor de la susceptancia (p.u).
- **rateA**: ratio de potencia a partir del cual la red se desconecta (larga duración, MVA, 0 = ilimitado).
- **rateB**: ratio de potencia a partir del cual la red se desconecta (corta duración, MVA, 0 = ilimitado).
- **rateC**: ratio de potencia a partir del cual la red se desconecta (emergencia, MVA, 0 = ilimitado).
- **ratio**: ratio nominal del transformador $\left(\frac{|V_f|}{|V_t|}\right)$.
- **angle**: Fase del transformador (grados).
- **status**: Estado de la línea (0 si está fuera de servicio o 1 si está en servicio).
- **angmin**: Ángulo mínimo de desfase ($\theta_f - \theta_t$, grados).
- **angmax**: Ángulo máximo de desfase ($\theta_f - \theta_t$, grados).

A continuación, se muestra un ejemplo de la implementación de estos datos en MATPOWER:

| fbus | tbus | r | x | b | rateA | rateB | rateC |
|-------|-------|---------|---------|--------|-------|-------|-------|
| 2 | 3 | 0.01030 | 0.08264 | 0.1452 | 400 | 400 | 400 |
| ratio | angle | status | angmin | angmax | | | |
| 0 | 0 | 1 | -360 | 360 | | | |

Tabla 6 Ejemplo de inserción de datos de líneas a MATPOWER

4.6. Principales módulos

En MATPOWER, el flujo de potencia se ejecuta llamando al comando *runpf* con el nombre del fichero el cual se han insertado los datos, el cual se dividen por diferentes casos *casedata*. Además de ejecutar el flujo de potencia, también es capaz de devolver la solución a la misma ejecutando el siguiente comando:

```
>> results = runpf(casedata);
```

Se pueden añadir campos adicionales para visualizar diferentes resultados que se recogen en la siguiente tabla. También, existen módulos adicionales para configurar las opciones con “*mpopt*” y que proporcione archivos para guardar e imprimir de forma más limpia con “*fname*” o el caso resuelto con “*solvedcase*”.

| name | description |
|--|---|
| <code>results.success</code> | success flag, 1 = succeeded, 0 = failed |
| <code>results.et</code> | computation time required for solution |
| <code>results.iterations</code> | number of iterations required for solution |
| <code>results.order</code> | see <code>ext2int</code> help for details on this field |
| <code>results.bus(:, VM)[†]</code> | bus voltage magnitudes |
| <code>results.bus(:, VA)</code> | bus voltage angles |
| <code>results.gen(:, PG)</code> | generator real power injections |
| <code>results.gen(:, QG)[†]</code> | generator reactive power injections |
| <code>results.branch(:, PF)</code> | real power injected into “from” end of branch |
| <code>results.branch(:, PT)</code> | real power injected into “to” end of branch |
| <code>results.branch(:, QF)[†]</code> | reactive power injected into “from” end of branch |
| <code>results.branch(:, QT)[†]</code> | reactive power injected into “to” end of branch |

[†] AC power flow only.

Figura 4.2 Los diferentes formatos de representaciones de los resultados en MATPOWER [13]



5. Implementación de un caso de estudio de flujo de cargas fundamental

5.1. Descripción del caso de estudio

En este capítulo se presenta un ejercicio de estudio que se resolverá mediante las herramientas de cálculo especificadas en este trabajo. Es una red de siete buses, tres unidades generadoras, cuenta con tres transformadores entre buses y cuenta con la siguiente distribución:

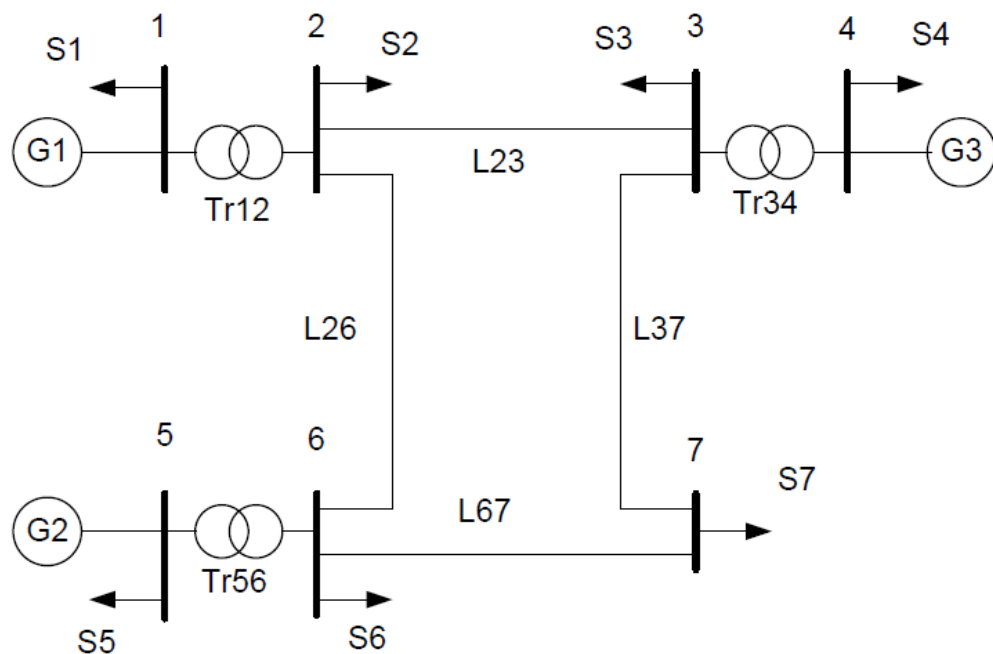


Figura 5.1 Esquema de la red

Los datos de la red son los siguientes:

| Bus | Tensión (kV) |
|-----|--------------|
| 1 | 11 |
| 2 | 220 |
| 3 | 220 |
| 4 | 25 |
| 5 | 25 |
| 6 | 220 |
| 7 | 220 |

Tabla 7 Tensiones base de los buses

| Nombre | Potencia nominal (MVA) | Tensión nominal primario (kV) | Tensión nominal secundario (kV) | Tensión de cortocircuito (%) |
|--------|------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Tr12 | 150 | 11 | 220 | 7 |
| Tr34 | 200 | 25 | 215 | 6 |
| Tr56 | 120 | 25 | 220 | 8 |

Tabla 8 Datos de los transformadores

| Nombre | R (Ω/km) | X (Ω/km) | B (S/km) | L (km) |
|--------|--------------------------|--------------------------|----------|--------|
| L23 | 0,05 | 0,4 | 3E-6 | 100 |
| L26 | 0,07 | 0,2 | 5,5E-6 | 90 |
| L37 | 0,07 | 0,2 | 5,5E-6 | 70 |
| L67 | 0,05 | 0,4 | 3E-6 | 120 |

Tabla 9 Datos de las líneas



| Nombre | Tipo | P _G (MW) | Q _G (MVar) | V(pu) | δ(°) |
|--------|-------|---------------------|-----------------------|-------|------|
| G1 | Slack | - | - | 0,98 | 0 |
| G2 | PQ | 130 | 60 | - | - |
| G3 | PV | 80 | - | 0,99 | - |

Tabla 10 Datos de los generadores

| Nombre | P _D (MW) | FP(i) |
|--------|---------------------|--------|
| S1 | 40 | 0,8(i) |
| S2 | 60 | 0,6(i) |
| S3 | 40 | 0,8(i) |
| S4 | 80 | 0,8(i) |
| S5 | 30 | 0,6(i) |
| S6 | 40 | 0,8(i) |
| S7 | 150 | 0,6(i) |

Tabla 11 Datos de las cargas

Antes de pasar a resolver el problema con las diferentes herramientas, se tienen que realizar unos pasos previos para adecuar el ejercicio. Estos pasos se tratan de la reducción a p.u. y las correcciones de algunas tensiones.

La reducción a p.u. o “tanto por uno” se han realizado los siguientes cálculos:

$$R(p.u) = \frac{R * l}{Z_b}$$

Ec. 5.1

$$X(p.u) = \frac{X * l}{Z_b}$$

Ec. 5.2

$$B(p.u) = B * l * Z_b$$

Ec. 5.3

Para pasar las potencias a p.u se ha tomado $S_b=100$ MVA y la tensión base se escoge dependiendo del transformador.

También se ha tenido que retocar el valor de la tensión base del primario en el transformador Tr34, para que la tensión base en el secundario coincida con la de los transformadores Tr12 y Tr56.

Para variar la tensión base del primario en el Tr34 se han realizado los siguientes cálculos:

$$a = \frac{V_{prim. nominal}}{V_{sec. nominal}} = \frac{V_{prim. base}}{V_{sec. base}}$$

Ec. 5.4

$$\frac{V4. nominal}{V3. nominal} = \frac{V4base'}{V3base}$$

Ec. 5.5

$$V4base' = \frac{V4. nominal}{V3. nominal} * V3base$$

Ec. 5.6

5.2. Resolución con InterPSS

Una vez estudiado los datos de la red eléctrica de estudio, se añaden al programa de manera gráfica los diferentes buses y transformadores y, dentro de ellos, se añaden las características de los mismos. Luego se crean las líneas eléctricas de conexión entre los buses configurando sus características. El esquema introducido en el programa y los valores del flujo de carga se expresan en la siguiente figura:

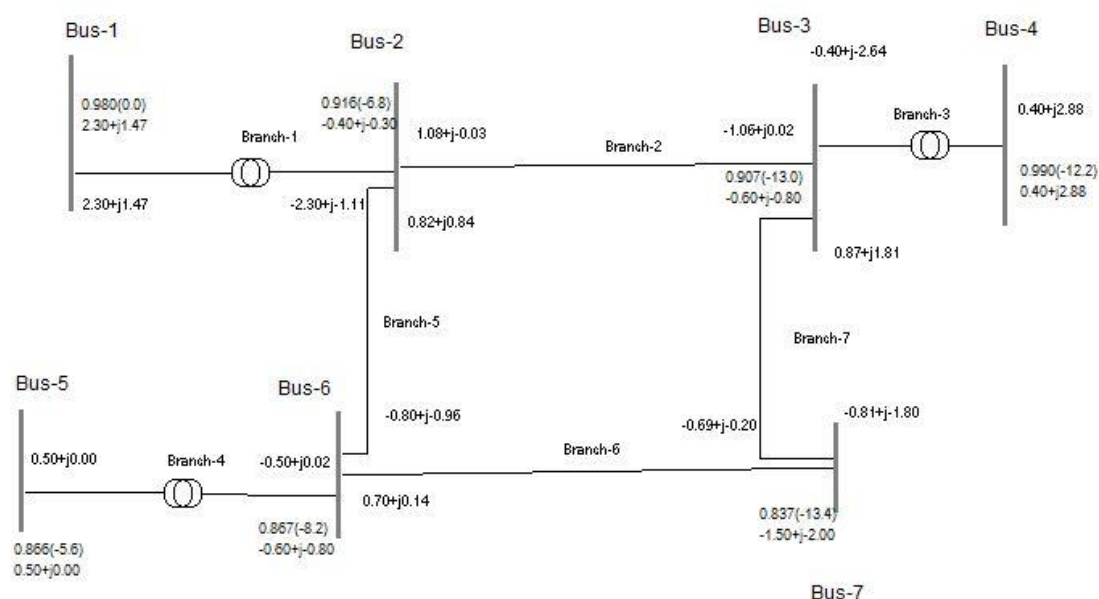


Figura 5.2 Esquema de la red con InterPSS

Los resultados del flujo de cargas resultantes de la herramienta de InterPSS mediante el método de Gauss-Seidel y una tolerancia de error de 0.0001 son los siguientes:

| Load Flow Summary | | | | | |
|-------------------|----------------|-----------|-------------|----------------|---------|
| Bus | | Max Power | Mismatches | | |
| | | dPmax | Bus | dQmax | |
| 0007 | | 0.000051 | 0007 | 0.000030 (pu) | |
| | | 5.106848 | | 3.004315 (kva) | |
| BusID | Code | Volt (pu) | Angle (deg) | P (pu) | Q (pu) |
| 0001 | Swing + ConstP | 0.98000 | 0.0 | 1.9745 | 1.4060 |
| 0002 | ConstP | 0.91788 | -5.9 | -0.6000 | -0.8000 |
| 0003 | ConstP | 0.90645 | -12.1 | -0.4000 | -0.3000 |
| 0004 | PV + ConstP | 0.96755 | -12.1 | 0.0000 | 2.0629 |
| 0005 | PQ + ConstP | 0.90814 | -1.5 | 1.0000 | 0.2000 |
| 0006 | ConstP | 0.89647 | -6.2 | -0.4000 | -0.3000 |
| 0007 | ConstP | 0.84459 | -12.3 | -1.5000 | -2.0000 |

Figura 5.3 Resumen de resultados del flujo de cargas con InterPSS

| Load Flow Results | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|-------------|--------|-------|------------|--------|--------|--------|-----------|-------------|---------|--------|--|
| Bus ID | Bus Voltage | | | Generation | | Load | | To Bus ID | Branch P+jQ | | | |
| | base | Mag | Ang | (mW) | (mVar) | (mW) | (mVar) | | (mW) | (mVar) | (kA) | |
| 0001 | 11000 | 0.9800 | 0.0 | 237.45 | 170.60 | 40.00 | 30.00 | 0002 | 197.45 | 140.60 | 12.982 | |
| 0002 | 220000 | 0.9179 | -5.9 | 0.00 | 0.00 | 60.00 | 80.00 | 0001 | -197.45 | -112.05 | 0.649 | |
| | | | | | | | | 0003 | 110.27 | -1.22 | 0.315 | |
| | | | | | | | | 0006 | 27.18 | 33.27 | 0.123 | |
| 0003 | 220000 | 0.9065 | -12.1 | 0.00 | 0.00 | 40.00 | 30.00 | 0004 | 0.00 | -193.26 | 0.56 | |
| | | | | | | | | 0007 | 68.77 | 162.17 | 0.51 | |
| | | | | | | | | 0002 | -108.77 | 1.09 | 0.315 | |
| 0004 | 25580 | 0.9676 | -12.1 | 80.00 | 266.29 | 80.00 | 60.00 | 0003 | -0.00 | 206.29 | 4.812 | |
| 0005 | 25000 | 0.9081 | -1.5 | 130.00 | 60.00 | 30.00 | 40.00 | 0006 | 100.00 | 20.00 | 2.593 | |
| 0006 | 220000 | 0.8965 | -6.2 | 0.00 | 0.00 | 40.00 | 30.00 | 0007 | 86.77 | 33.43 | 0.272 | |
| | | | | | | | | 0005 | -100.00 | -11.59 | 0.295 | |
| | | | | | | | | 0002 | -26.77 | -51.84 | 0.123 | |
| 0007 | 220000 | 0.8446 | -12.3 | 0.00 | 0.00 | 150.00 | 200.00 | 0006 | -85.36 | -35.34 | 0.272 | |
| | | | | | | | | 0003 | -64.64 | -164.66 | 0.51 | |

Figura 5.4 Resultados ampliados del flujo de cargas con InterPSS

5.3. Resolución con MATLAB

Para este ejemplo, también se adecuan los resultados a tanto por uno y se usa el sistema numérico iterativo de Gauss-Seidel con una tolerancia de error de 0.0001. Se utiliza la versión R2018a y la programación utilizada se muestra en el volumen anexo (apartado A1) de este mismo trabajo. Los resultados obtenidos son los siguientes:

```
iter Mod_V2 Ang_V2 Mod_V3 Ang_V3 Mod_V4 Ang_V4 Mod_V5 Ang_V5 Mod_V6 Ang_V6
Mod_V7 Ang_V7
```

```
54 0.9177 -5.8489 0.9066 -12.0851 0.9675 -12.0848 0.9080 -1.4514
0.8963 -6.1536 0.8447 -12.3041
```

```
S12 =
```

```
1.9639 + 1.4080i
```

```
S21 =
```

```
-1.9639 - 1.1242i
```

```
S23 =
```

```
1.0950 + 0.0203i
```

```
S26 =
```

```
0.2712 + 0.3850i
```

S32 =

-1.0807 + 0.0374i

S34 =

-0.0002 - 1.9282i

S37 =

0.6860 + 1.6585i

S43 =

0.0002 + 2.0579i

S56 =

1.0008 + 0.2001i

S62 =

-0.2672 - 0.4722i

S65 =

-1.0008 - 0.1159i

S67 =

0.8687 + 0.3712i

S73 =

-0.6453 - 1.6117i

S76 =

-0.8549 - 0.3239i

S1 =

1.9639 + 1.4080i

S2 =

-0.5977 - 0.7190i



```

S3 =
    -0.3949 - 0.2323i

S4 =
    0.0002 + 2.0579i

S5 =
    1.0008 + 0.2001i

S6 =
    -0.3993 - 0.2168i

S7 =
    -1.5002 - 1.9356i

SG1 =
    2.3639 + 1.7080i

QG4 =
    2.6579

rend =
    97.5439

```

Figura 5.5 Resultados del flujo de cargas con MATLAB

5.4. Resolución con MATPOWER

La entrada de datos de MATPOWER utilizada en este trabajo para resolver el flujo de potencias, se puede observar en el volumen anexo (apartado A2) de este trabajo, usando la versión matpower6.0. Para cambiar el método de Newton-Raphson y emplear Gauss-Seidel, así como establecer la misma tolerancia de error de 0.0001 se utilizan los siguientes comandos:

```

>> mpopt=mpoption ('pf.alg', 'GS', 'pf.tol', 0.0001);

>> results=runpf ('case_tfg_6B', mpopt);

```

Los resultados obtenidos mediante la herramienta MATPOWER se presentan a continuación:

| | | | | | | | | |
|---|--------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|---------|-----------|----------------|----------|
| MATPOWER Version 6.0, 16-Dec-2016 -- AC Power Flow (Gauss-Seidel) | | | | | | | | |
| Gauss-Seidel power flow converged in 92 iterations. | | | | | | | | |
| Converged in 1.95 seconds | | | | | | | | |
| ===== | | | | | | | | |
| System Summary | | | | | | | | |
| ===== | | | | | | | | |
| How many? | | How much? | P (MW) | Q (MVar) | | | | |
| ----- | | ----- | ----- | ----- | | | | |
| Buses | 7 | Total Gen Capacity | 299999997.0 | -29997.0 to 29997 | | | | |
| Generators | 3 | On-line Capacity | 299999997.0 | -29997.0 to 29997 | | | | |
| Committed Gens | 3 | Generation (actual) | 447.4 | 496.9 | | | | |
| Loads | 7 | Load | 440.0 | 470.0 | | | | |
| Fixed | 7 | Fixed | 440.0 | 470.0 | | | | |
| Dispatchable | 0 | Dispatchable | -0.0 of -0.0 | -0.0 | | | | |
| Shunts | 0 | Shunt (inj) | -0.0 | 0.0 | | | | |
| Branches | 7 | Losses (I^2 * Z) | 7.45 | 86.22 | | | | |
| Transformers | 0 | Branch Charging (inj) | - | 59.3 | | | | |
| Inter-ties | 0 | Total Inter-tie Flow | 0.0 | 0.0 | | | | |
| Areas | 1 | | | | | | | |
| ===== | | | | | | | | |
| | | Minimum | Maximum | | | | | |
| ----- | | ----- | ----- | | | | | |
| Voltage Magnitude | 0.845 p.u. @ bus 7 | | 0.980 p.u. @ bus 1 | | | | | |
| Voltage Angle | -12.33 deg @ bus 7 | | 0.00 deg @ bus 1 | | | | | |
| P Losses (I^2*R) | - | | 4.14 MW @ line 3-7 | | | | | |
| Q Losses (I^2*X) | - | | 28.55 MVar @ line 1-2 | | | | | |
| ===== | | | | | | | | |
| Bus Data | | | | | | | | |
| ===== | | | | | | | | |
| Bus | Voltage | | Generation | | Load | | | |
| # | Mag(pu) | Ang(deg) | P (MW) | Q (MVar) | P (MW) | Q (MVar) | | |
| ----- | | | | | | | | |
| 1 | 0.980 | 0.000* | 237.43 | 170.65 | 40.00 | 30.00 | | |
| 2 | 0.918 | -5.879 | - | - | 60.00 | 80.00 | | |
| 3 | 0.906 | -12.133 | - | - | 40.00 | 30.00 | | |
| 4 | 0.967 | -12.133 | 80.00 | 266.25 | 80.00 | 60.00 | | |
| 5 | 0.908 | -1.492 | 130.00 | 60.00 | 30.00 | 40.00 | | |
| 6 | 0.896 | -6.190 | - | - | 40.00 | 30.00 | | |
| 7 | 0.845 | -12.334 | - | - | 150.00 | 200.00 | | |
| Total: | | | 447.43 | 496.90 | 440.00 | 470.00 | | |
| ===== | | | | | | | | |
| Branch Data | | | | | | | | |
| ===== | | | | | | | | |
| Brnch | From | To | From Bus | Injection | To Bus | Injection | Loss (I^2 * Z) | |
| # | Bus | Bus | P (MW) | Q (MVar) | P (MW) | Q (MVar) | P (MW) | Q (MVar) |
| ----- | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 2 | 197.43 | 140.65 | -197.43 | -112.10 | -0.000 | 28.55 |
| 2 | 2 | 3 | 110.27 | -1.19 | -108.78 | 1.06 | 1.490 | 11.95 |
| 3 | 3 | 4 | -0.00 | -193.23 | 0.00 | 206.25 | 0.000 | 13.02 |
| 4 | 2 | 6 | 27.16 | 33.28 | -26.76 | -51.85 | 0.404 | 1.16 |
| 5 | 3 | 7 | 68.79 | 162.17 | -64.65 | -164.66 | 4.139 | 11.82 |
| 6 | 6 | 7 | 86.76 | 33.44 | -85.35 | -35.34 | 1.413 | 11.31 |
| 7 | 5 | 6 | 100.00 | 20.00 | -100.00 | -11.59 | 0.000 | 8.41 |
| Total: | | | | | | | 7.446 | 86.22 |

Figura 5.6 Resultados del flujo de cargas con MATPOWER

5.5. Comparación de resultados

En las siguientes tablas se resumen los diferentes valores obtenidos con las herramientas de cálculo utilizadas:

| TENSIONES | INTERPSS | MATLAB | MATPOWER |
|--------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| V_1 (p.u.) | $0.9800 \angle 0.00^\circ$ | $0.9800 \angle 0.00^\circ$ | $0.9800 \angle 0.00^\circ$ |
| V_2 (p.u.) | $0.9178 \angle -5.90^\circ$ | $0.9177 \angle -5.84^\circ$ | $0.9180 \angle -5.88^\circ$ |
| V_3 (p.u.) | $0.9064 \angle -12.10^\circ$ | $0.9066 \angle -12.08^\circ$ | $0.9060 \angle -12.13^\circ$ |
| V_4 (p.u.) | $0.9675 \angle -12.10^\circ$ | $0.9675 \angle -12.08^\circ$ | $0.9670 \angle -12.13^\circ$ |
| V_5 (p.u.) | $0.9081 \angle -1.50^\circ$ | $0.9080 \angle -1.45^\circ$ | $0.9080 \angle -1.49^\circ$ |
| V_6 (p.u.) | $0.8964 \angle -6.20^\circ$ | $0.8963 \angle -6.15^\circ$ | $0.8960 \angle -6.19^\circ$ |
| V_7 (p.u.) | $0.8445 \angle -12.30^\circ$ | $0.8447 \angle -12.30^\circ$ | $0.8450 \angle -12.33^\circ$ |

Tabla 12 Comparación de las tensiones de todos los buses (módulo y argumento) obtenidos con las diferentes herramientas de cálculo

| FLUJOS DE POTENCIA | INTERPSS | MATLAB | MATPOWER |
|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| S_{12} (p.u.) | $1.9814 + 1.4066i$ | $1.9639 + 1.4080i$ | $1.9749 + 1.4034i$ |
| S_{21} (p.u.) | $-1.9814 - 1.1197i$ | $-1.9639 - 1.1242i$ | $-1.9749 - 1.1182i$ |
| S_{23} (p.u.) | $1.0891 + 0.0231i$ | $1.0950 + 0.0203i$ | $1.0988 + 0.0292i$ |
| S_{26} (p.u.) | $0.2699 + 0.3861i$ | $0.2712 + 0.3850i$ | $0.2782 + 0.3979i$ |
| S_{32} (p.u.) | $-1.0750 + 0.0333i$ | $-1.0807 + 0.0374i$ | $-1.0845 + 0.0293i$ |
| S_{34} (p.u.) | $-0.0000 - 1.9328i$ | $-0.0002 - 1.9282i$ | $-0.0000 - 1.9603i$ |
| S_{37} (p.u.) | $0.6783 + 1.6616i$ | $0.6860 + 1.6585i$ | $0.6701 + 1.6366i$ |

| | | | |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| S_{43} (p.u.) | 0.0000 + 2.0631i | 0.0002 + 2.0579i | 0.0000 + 2.0944i |
| S_{56} (p.u.) | 1.0006 + 0.2000i | 1.0008 + 0.2001i | 0.9995 + 0.2044i |
| S_{62} (p.u.) | -0.2658 - 0.4733i | -0.2672 - 0.4722i | -0.2739 - 0.4844i |
| S_{65} (p.u.) | -1.0006 - 0.1159i | -1.0008 - 0.1159i | -0.9995 - 0.1203i |
| S_{67} (p.u.) | 0.8622 + 0.3736i | 0.8687 + 0.3712i | 0.8670 + 0.3655i |
| S_{73} (p.u.) | -0.6375 - 1.6148i | -0.6453 - 1.6117i | -0.6305 - 1.5930i |
| S_{76} (p.u.) | -0.8486 - 0.3275i | -0.8549 - 0.3239i | -0.8534 - 0.3190i |

Tabla 13 Comparación de los flujos de potencia en todas las líneas obtenidos con las diferentes herramientas de cálculo

| POTENCIAS INYECTADAS | INTERPSS | MATLAB | MATPOWER |
|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| S_1 (p.u.) | 1.9814 + 1.4066i | 1.9639 + 1.4080i | 1.9749 + 1.4034i |
| S_2 (p.u.) | -0.6224 - 0.7106i | -0.5977 - 0.7190i | -0.5979 - 0.6911i |
| S_3 (p.u.) | -0.3967 - 0.2378i | -0.3949 - 0.2323i | -0.4143 - 0.2943i |
| S_4 (p.u.) | 0.0000 + 2.0631i | 0.0002 + 2.0579i | 0.0000 + 2.0944i |
| S_5 (p.u.) | 1.0006 + 0.2000i | 1.0008 + 0.2001i | 0.9995 + 0.2044i |
| S_6 (p.u.) | -0.4042 - 0.2155i | -0.3993 - 0.2168i | -0.4064 - 0.2391i |
| S_7 (p.u.) | -1.4862 - 1.9422i | -1.5002 - 1.9356i | -1.4839 - 1.9120i |

Tabla 14 Comparación de las potencias inyectadas en todos los buses obtenidos con las diferentes herramientas de cálculo

| RENDIMIENTO | INTERPSS | MATLAB | MATPOWER |
|-------------|----------|---------|----------|
| η (%) | 97.5675 | 97.5439 | 97.5813 |

Tabla 15 Comparación del rendimiento de la red obtenidos con las diferentes herramientas de cálculo

Tras haber realizado la simulación del flujo de cargas mediante el método numérico de Gauss-Seidel con las diferentes herramientas de cálculo, podemos fijarnos en las pocas diferencias en los resultados obtenidos. Por otro lado, el procedimiento es muy diferente en cada uno de los tres programas. InterPSS nos ofrece introducir los datos de forma más visual y accesible, ya que en los dos restantes son programación con un lenguaje específico. Es fácil cambiar entre diferentes métodos numéricos y añadir datos específicos, ya que es un software para resolver este tipo de problemas.

En cambio, como ya se ha mencionado anteriormente, MATLAB es un programa más accesible aun no siendo un software gratuito. El gran inconveniente de este programa es que, partiendo de una hoja en blanco, se ha de introducir manualmente toda la programación. Se puede ajustar mejor a nosotros, pero conlleva tiempo y esfuerzo, así como a posibles errores a la hora de programar.

MATPOWER utiliza las ventajas que nos ofrece MATLAB y crea una extensión para realizar este tipo de problemas. Facilita mediante su programación y los diferentes casos ya realizados, una fácil, cómoda y correcta resolución de flujos de cargas fundamental. El tiempo estimado para realizar diferentes ejercicios se ven reducidos, así como disminuir el riesgo de fallos por parte del usuario, ya que limita y guía a la hora de introducir los datos.

Visto la gran facilidad que hay para resolver diferentes flujos de cargas y utilizando un tiempo inferior al resto de programa, ayuda a la creación y al estudio de más casos. Al ser una extensión de un programa de fácil acceso, se convierte en una herramienta de cálculo ideal para fines educativos. Por esto mismo, en este trabajo se realiza la incorporación de un flujo armónico de cargas para MATPOWER.

6. Fundamentos teóricos e indicadores de la distorsión armónica en señales periódicas

En este capítulo se presentarán una serie de conceptos teóricos para la comprensión de los apartados siguientes y el entendimiento de la programación de los flujos armónicos de cargas.

6.1. Valor medio de una señal periódica

El valor medio de una señal periódica $x(t)$ de período T es el promedio de los valores que toma la señal a lo largo del período.

$$X_{medio} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

Ec. 6.1

Siendo un valor nulo en las señales periódicas sinusoidales.

6.2. Valor eficaz de una señal periódica

El valor eficaz de una señal periódica $x(t)$ de período T es la raíz cuadrada del valor medio del cuadrado de dicha señal a lo largo del período.

$$X = X_{eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

Ec. 6.2

Si la señal es periódica, el valor eficaz será $X_{max}/\sqrt{2}$.

6.3. Distorsión de una señal sinusoidal

Toda onda periódica se puede descomponer mediante el teorema de Fourier en una serie de componentes senoidales. El teorema de Fourier establece unas condiciones por la cual se puede descomponer una función periódica no sinusoidal en una suma infinita de funciones formada por:

- Una función constante formando la componente continua
- Una función sinusoidal de frecuencia f formando la componente fundamental

- La suma infinita de funciones sinusoidales de frecuencia múltiplo de la fundamental (componentes armónicas o simplemente armónicos), denominándose por el armónico de orden h o h -ésimo armónico la componente sinusoidal cuya frecuencia es h veces la frecuencia fundamental.

Lo anterior queda expresado con:

$$x(t) = X_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot X_h \cdot \cos(h\omega t + \varphi_{X_h})$$

Ec. 6.3

donde:

$x(t)$ es la función periódica de la descomposición armónica

X_0 es la componente continua, que corresponde al valor medio de $x(t)$

$\sqrt{2} \cdot X_h \cdot \cos(h\omega t + \varphi_{X_h})$ son las componentes sinusoidales (fundamental y armónicas), siendo cada una de ellas:

X_h el valor eficaz de la h -ésima componente sinusoidal.

$h\omega$ la frecuencia angular de la h -ésima componente sinusoidal, siendo h el orden de la componente

φ_{X_h} la fase de la h -ésima componente sinusoidal.

Conociendo la descomposición en serie de Fourier de una función periódica no sinusoidal, puede calcularse el valor eficaz de dicha función haciendo uso de la formula descrita en el apartado anterior

$$X = X_{eficaz} = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} X_h^2}$$

Ec. 6.4

La componente continua y las componentes sinusoidales armónicas de una señal periódica constituyen la distorsión de su componente sinusoidal fundamental.

6.4. Indicadores de la distorsión armónica

Existen muchos indicadores existentes para cuantificar y valorar la distorsión armónica de ondas sinusoidales. A continuación, se detallarán los más importantes.

6.4.1. Valor eficaz

El valor eficaz, para el caso de ondas sinusoidales afectadas únicamente por la distorsión armónica, se define mediante la siguiente expresión, a partir de la ecuación Ec. 6.4 adoptando $h \geq 1$.

$$X = X_{eficaz} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} X_h^2}$$

Ec. 6.5

6.4.2. Distorsión armónica individual

La distorsión armónica individual (*IHD*, *Individual harmonic distortion*) se define como el cociente entre el valor eficaz de la componente armónica h y el valor eficaz de la componente fundamental.

$$HD_{X_h} = \frac{X_h}{X_1} \cdot 100 [\%]$$

Ec. 6.6

6.4.3. Espectro armónico

El espectro armónico (*Harmonic spectrum*) se define como la representación gráfica de los valores de distorsión armónica individual en función del orden armónico. En esta representación armónica, también se representa la componente fundamental. Esta representación se hace mediante el diagrama de barras, como el que se muestra a continuación:

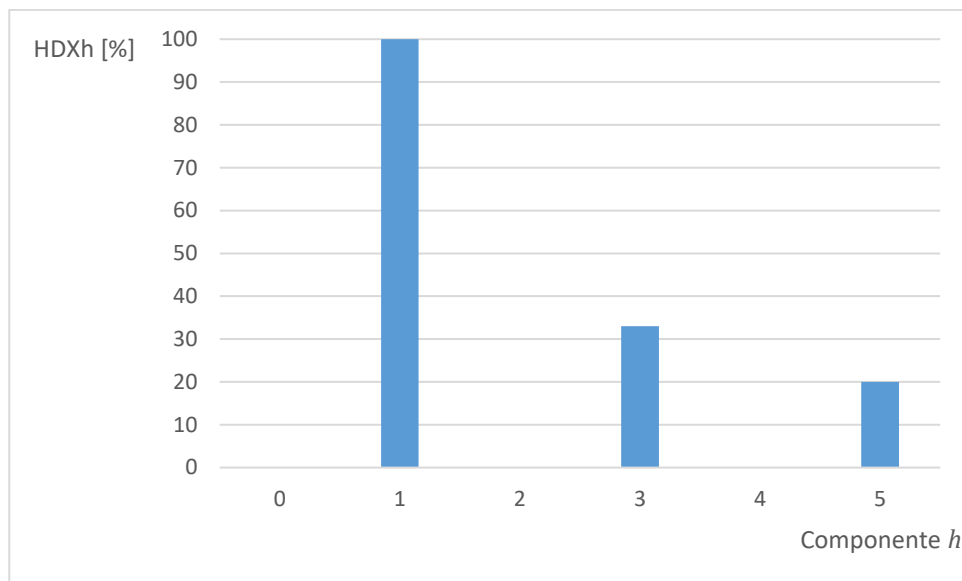


Figura 6.1 Espectro armónico de las componentes con mayor valor de distorsión armónica individual

6.4.4. Distorsión armónica total

La distorsión total (Total harmonic distortion) se define como la raíz cuadrada del sumatorio de los cuadrados de las distorsiones armónicas individuales en tanto por ciento.

$$THD_X = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} HD_{X_h}^2} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} X_h^2}}{X_1} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Ec. 6.7

7. Cargas no lineales: Fuente de alimentación monofásica

Tal como se ha comentado anteriormente, en los sistemas eléctricos de potencia cada vez son más frecuentes las cargas no lineales. Estas cargas producen distorsión tanto en el voltaje como en la intensidad del suministro eléctrico.

En este trabajo se estudiará el modelo de la fuente de alimentación monofásica, como caso base. Se descompondrá su comportamiento por tramos que llevan asociadas una ecuación diferencial lineal cada uno.

El modelo físico de una fuente de alimentación monofásica será un rectificador ideal en puente con un condensador de filtro (C) que alimenta una carga que se representa con una resistencia (R). Se tienen en cuenta la resistencia y reactancia (inductiva) presentes tanto en el lado de alterna (R_L y L_L) como en la de continua (R_C y L_C).

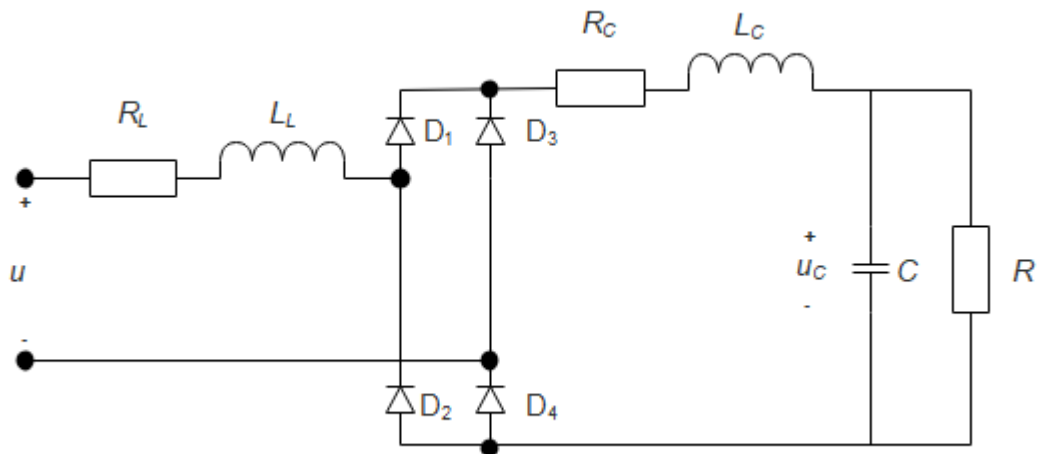


Figura 7.1 Circuito simplificado que corresponde a una fuente de alimentación monofásica con un filtro capacitivo

Cuando la fuente de alimentación monofásica es alimentada por la tensión, consume una corriente que se muestra en la figura siguiente, adoptando como hipótesis estar en situación de régimen permanente.

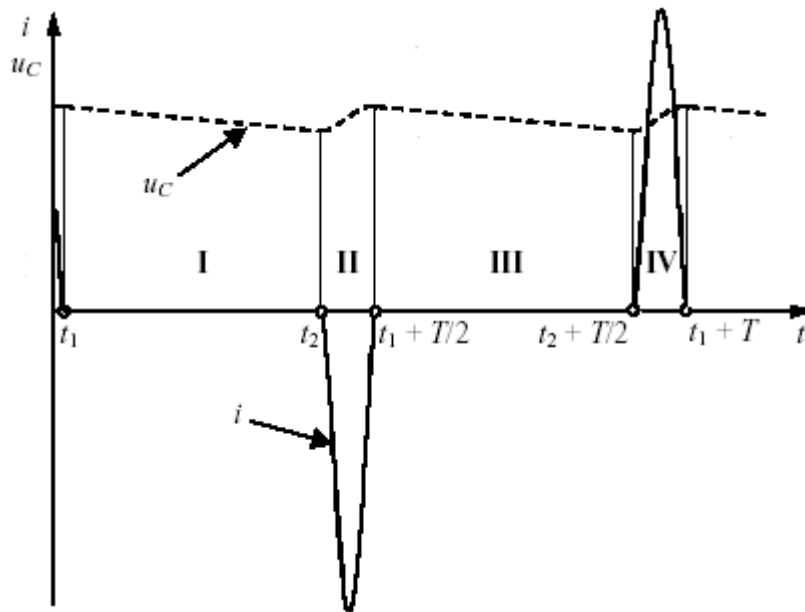


Figura 7.2. Evolución temporal de un periodo de la corriente consumida por la fuente de alimentación monofásica y de la tensión en bornes del condensador. Fuente: [10]

La expresión que describe la tensión suministrada a la fuente de alimentación monofásica es la siguiente:

$$u(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot U_h \cdot \cos(h\omega t + \varphi_{U_h})$$

Ec. 7.1

El comportamiento de esta carga no lineal puede descomponerse en los tramos I, II, III y IV, cuyos respectivos circuitos lineales asociados se ilustran a continuación.

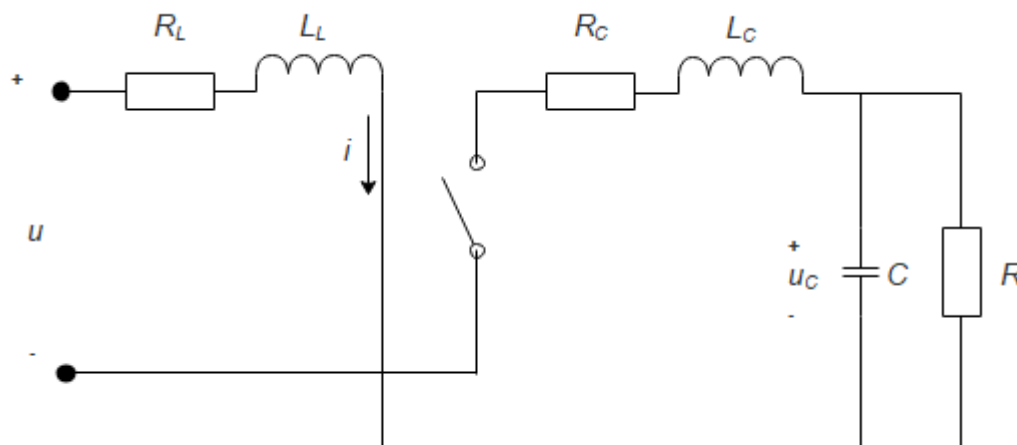


Figura 7.3 Circuito lineal asociado al tramo I

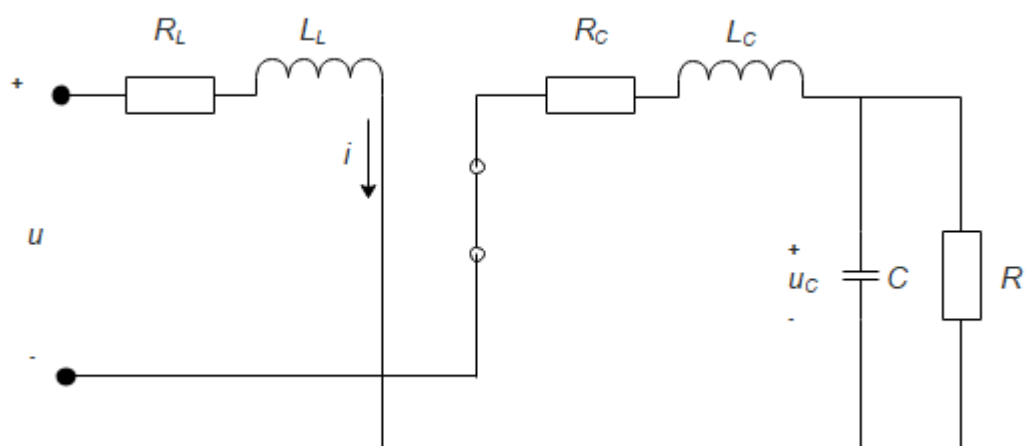


Figura 7.4 Circuito lineal asociado al tramo II

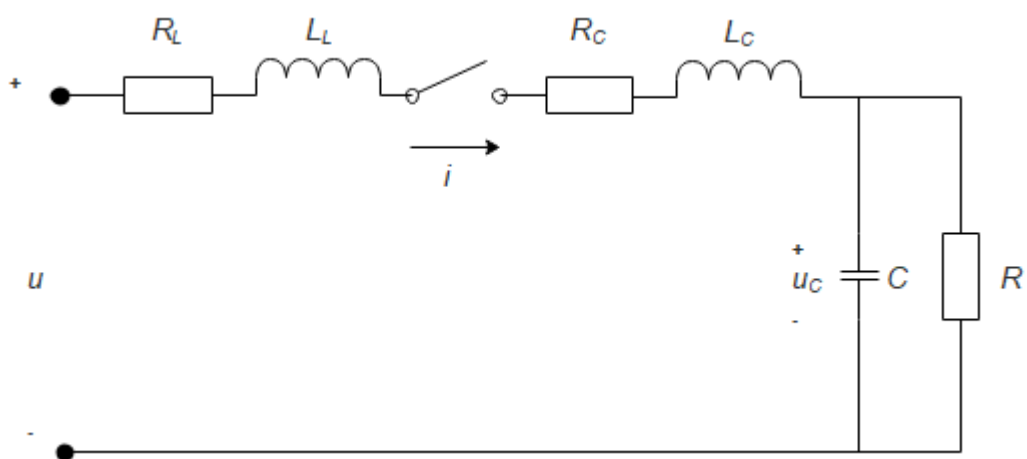


Figura 7.5 Circuito lineal asociado al tramo III

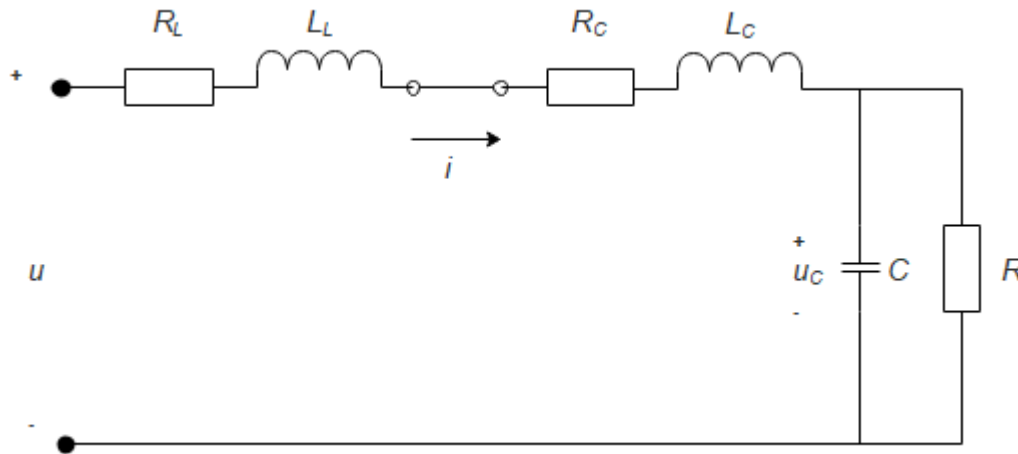


Figura 7.6 Circuito lineal asociado al tramo IV

En este caso se tienen dos variables dinámicas. Se considerará que estas variables son la tensión u_c en bornes del condensador y la corriente i consumida por la fuente de alimentación monofásica.

7.1.1. Tramo I

Dado que el rectificador no conduce durante este tramo, $i^{(I)}(t) = 0$, la variable dinámica a resolver es u_c . La ecuación diferencial correspondiente a este primer tramo es

$$0 = -C \frac{du_c^{(I)}}{dt} - \frac{u_c^{(I)}(t)}{R}$$

Ec. 7.2

de cuya resolución se obtiene la siguiente expresión:

$$u_c^{(I)}(t) = K^{(I)} e^{-\frac{t}{RC}}$$

Ec. 7.3

7.1.2. Tramo II

Durante el tramo 2, el rectificador conduce a partir de la semionda negativa de la tensión de alimentación, teniendo en cuenta que consideramos un rectificador ideal, las expresiones serán las siguientes:

$$\begin{cases} i^{(II)}(t) = -C \frac{du_c^{(II)}}{dt} - \frac{u_c^{(II)}(t)}{R} \\ u(t) = R_E i^{(II)}(t) + L_E \frac{di^{(II)}}{dt} - u_c^{(II)}(t) \end{cases}$$

Ec. 7.4

siendo $R_E = R_L + R_C$ y $L_E = L_L + L_C$.

Teniendo en cuenta que las raíces de su polinomio característico, tomando:

$$\mu = -\left(\frac{1}{2}\right) \frac{(L_E + R_E RC)}{(L_E RC)}$$

Ec. 7.5

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{|D|}}{2}$$

Ec. 7.6

con el discriminante que se calcula mediante

$$D = \frac{(L_E^2 - 2L_E R_E RC + R_E^2 R^2 C^2 - 4L_E R^2 C)}{(L_E^2 R^2 C^2)}$$

Ec. 7.7

son:

$$\lambda_1 = \mu + \varepsilon$$

Ec. 7.8

$$\lambda_2 = \mu - \varepsilon$$

Ec. 7.9

En el caso aperiódico, cuando el discriminante es mayor a 0 ($D > 0$), la solución vendrá dada por

$$u_c^{(II)}(t) = -K_1^{(II)} e^{\lambda_1 t} - K_2^{(II)} e^{\lambda_2 t} - \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} F_k U_k \cos(k\omega t + \phi_{F_k} + \phi_{U_k})$$

Ec. 7.10

junto con la corriente

$$i^{(II)}(t) = K_{1p}K_1^{(II)}e^{\lambda_1 t} + K_{2p}K_2^{(II)}e^{\lambda_2 t} + \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2}M_h U_h \cos(h\omega t + \varphi_{M_h} + \varphi_{U_h})$$

Ec. 7.11

con

$$K_{1p} = \left(\frac{1}{R}\right) + \lambda_1 C$$

Ec. 7.12

$$K_{2p} = \left(\frac{1}{R}\right) + \lambda_2 C$$

Ec. 7.13

En el caso contrario, el caso oscilante que se da cuando el discriminante es inferior a 0, ($D < 0$) la solución completa vendrá dada por:

$$u_c^{(II)}(t) = -K_1^{(II)}e^{\mu t} \cos(\varepsilon t + K_2^{(II)}) - \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2}F_h U_h \cos(h\omega t + \varphi_{F_h} + \varphi_{U_h})$$

Ec. 7.14

junto con la corriente

$$i^{(II)}(t) = K_1^{(II)}e^{\mu t} \left[K_{pr} \cos(\varepsilon t + K_2^{(II)}) - K_{pi} \sin(\varepsilon t + K_2^{(II)}) \right] + \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2}M_h U_h \cos(h\omega t + \varphi_{M_h} + \varphi_{U_h})$$

Ec. 7.15

con

$$K_{pr} = \left(\frac{1}{R}\right) + \mu C$$

Ec. 7.16

$$K_{pi} = \varepsilon C$$

Ec. 7.17

siendo para todos los casos: $M_h = |\underline{M}_h|$, $\varphi_{M_h} = \angle \underline{M}_h$, $F_h = |\underline{F}_h|$ y $\varphi_{F_h} = \angle \underline{F}_h$ con

$$\underline{M}_h = \underline{Y}_h \underline{F}_h$$

Ec. 7.18

$$\underline{F}_h = \frac{\left(\frac{1}{\underline{Y}_h}\right)}{\left(\underline{Z}_h + \left(\frac{1}{\underline{Y}_h}\right)\right)}$$

Ec. 7.19

$$\underline{Y}_h = \left(\frac{1}{R}\right) + jh\omega C$$

Ec. 7.20

$$\underline{Z}_h = R_E + jh\omega L_E$$

Ec. 7.21

7.1.3. Tramos III y IV

Dado que las expresiones de ambos tramos solo difieren en el signo de la tensión de alimentación y que la evolución temporal de la corriente consumida también la presenta, así como la tensión del condensador, se cumple:

$$\begin{cases} u_c^{(III)}(t) = u_c^{(I)}\left(t - \frac{T}{2}\right) \\ u_c^{(IV)}(t) = u_c^{(II)}\left(t - \frac{T}{2}\right) \end{cases}$$

Ec. 7.22

junto con la corriente

$$\begin{cases} i^{(III)}(t) = -i^{(I)}(t - T/2) \\ i^{(IV)}(t) = -i^{(II)}(t - T/2) \end{cases}$$

Ec. 7.23

Y esto simplifica el desarrollo del modelo matemático completo, reduciendo así el desarrollo de dos tramos. Las condiciones de continuidad tanto en tensión como en intensidad serán:

$$u_c^{(II)}(t_2) = u_c^{(I)}(t_2)$$

Ec. 7.24

$$i^{(II)}(t_2) = i^{(I)}(t_2) = 0$$

Ec. 7.25

La condición de periodicidad es:

$$u_c^{(I)}(t_1) = u_c^{(II)}\left(t_1 + \frac{T}{2}\right)$$

Ec. 7.26

Las condiciones de cambio tendremos tanto en tensión como en corriente:

$$u_c^{(I)}(t_2) = -u(t_2)$$

Ec. 7.27

$$i^{(II)}\left(t_1 + \frac{T}{2}\right) = i^{(III)}\left(t_1 + \frac{T}{2}\right) = 0$$

Ec. 7.28

7.1.4. Determinación de constantes

Las constantes, $K_1^{(II)}$, $K_2^{(II)}$ y $K_1^{(I)}$, a partir de las expresiones Ec. 7.24, Ec. 7.25 y Ec. 7.26 se obtiene en el caso aperiódico:

$$K_1^{(II)} = \frac{1}{(K_{2p} - K_{1p})e^{\lambda_1 t_2}} \left[\sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} M_h U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_{M_h} + \varphi_{U_h}) + K_{2p} \left(\sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_{U_h}) - \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} F_h U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_{F_h} + \varphi_{U_h}) \right) \right]$$

Ec. 7.29

$$K_2^{(II)} = \frac{1}{(K_{1p} - K_{2p})e^{\lambda_2 t_2}} \left[\sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} M_h U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_{M_h} + \varphi_{U_h}) \right. \\ \left. + K_{1p} \left(\sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_{U_h}) \right) \right. \\ \left. - \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} F_h U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_{F_h} + \varphi_{U_h}) \right]$$

Ec. 7.30

$$K^{(I)} = e^{\frac{t_1}{RC}} \left[-K_1^{(II)} e^{\lambda_1(t_1+T/2)} - K_2^{(II)} e^{\lambda_2(t_1+T/2)} + \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} F_h U_h \cos(h\omega t_1 + \varphi_{F_h} + \varphi_{U_h}) \right]$$

Ec. 7.31

o en el caso oscilante las constantes son:

$$K_1^{(II)} = \sqrt{(K_r^{(II)})^2 + (K_i^{(II)})^2}$$

Ec. 7.32

$$K_2^{(II)} = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{K_i^{(II)}}{K_r^{(II)}} \right) & \text{si } K_r^{(II)} \geq 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{K_i^{(II)}}{K_r^{(II)}} \right) + \pi & \text{si } K_r^{(II)} < 0 \text{ y } K_i^{(II)} > 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{K_i^{(II)}}{K_r^{(II)}} \right) - \pi & \text{si } K_r^{(II)} < 0 \text{ y } K_i^{(II)} \leq 0 \end{cases}$$

Ec. 7.33

$$K_r^{(II)} = \frac{e^{-\mu t_2}}{K_{pi}} \left[(K_{pr} \sin(\epsilon t_2) + K_{pi} \cos(\epsilon t_2)) \left(\sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_{U_h}) \right) \right. \\ \left. - \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} F_h U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_{F_h} + \varphi_{U_h}) \right) \\ \left. + \sin(\epsilon t_2) \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} M_h U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_{M_h} + \varphi_{U_h}) \right]$$

Ec. 7.34

$$K_i^{(II)} = \frac{e^{-\mu t_2}}{K_{pi}} \left[(K_{pr} \cos(\varepsilon t_2) - K_{pi} \sin(\varepsilon t_2)) \left(\sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_{U_h}) - \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} F_h U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_{F_h} + \varphi_{U_h}) \right) + \cos(\varepsilon t_2) \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} M_h U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_{M_h} + \varphi_{U_h}) \right]$$

Ec. 7.35

$$K^{(I)} = e^{\frac{t_1}{RC}} \left[-K_1^{(II)} e^{\mu(t_1+T/2)} \cos(\varepsilon(t_1 + T/2) + K_2^{(II)}) + \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} F_h U_h \cos(h\omega t_1 + \varphi_{F_h} + \varphi_{U_h}) \right]$$

Ec. 7.36

7.1.5. Determinación de los tiempos de conmutación

Los tiempos de conmutación t_1 y t_2 también dependen de la discriminante (D). En el caso aperiódico, a partir de las ecuaciones de condiciones de cambio:

$$K^{(I)} e^{-\frac{t_2}{RC}} = - \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} \cdot U_h \cdot \cos(h\omega t_2 + \varphi_{U_h})$$

Ec. 7.37

junto con:

$$K_{1p} K_1^{(II)} e^{\lambda_1(t_1+T/2)} + K_{2p} K_2^{(II)} e^{\lambda_2(t_1+T/2)} - \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} M_h U_h \cos(h\omega t_1 + \varphi_{M_h} + \varphi_{U_h}) = 0$$

Ec. 7.38

Y en el caso oscilante

$$K^{(I)} e^{-\frac{t_2}{RC}} = - \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} \cdot U_h \cdot \cos(h\omega t_2 + \varphi_{U_h})$$

Ec. 7.39

$$K_1^{(II)} e^{\mu(t_1+T/2)} \left[K_{pr} \cos(\varepsilon(t_1 + T/2) + K_2^{(II)}) - K_{pi} \sin(\varepsilon(t_1 + T/2) + K_2^{(II)}) \right] - \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h_{max}} \sqrt{2} M_h U_h \cos(h\omega t_1 + \varphi_{M_h} + \varphi_{U_h}) = 0$$

Ec. 7.40

Expresando las constantes según lo visto en el apartado anterior para cada caso de D , se llega a un sistema de ecuaciones no lineales cuyas incógnitas son los tiempos de conmutación t_1 y t_2 . Para la resolución de este sistema se emplea un método iterativo que debe tener unos valores iniciales. Estos valores son para t_1 y t_2 respectivamente:

$$t_1 = -\frac{\varphi_{U_1}}{\omega} - \frac{T}{200}$$

Ec. 7.41

$$t_2 = t_p - \frac{\varphi_{U_1}}{\omega}$$

Ec. 7.42

donde

$$e^{-\frac{t_p}{RC}} + \cos(\omega t_p) = 0$$

Ec. 7.43

en el intervalo $\frac{T}{4} < t_p < \frac{T}{2}$.

7.1.6. Modelo matemático completo

Las expresiones de las intensidades vistas en el tramo del caso aperiódico y el caso oscilante constituyen el modelo matemático completo de la intensidad asociado a la fuente de alimentación monofásica. Posteriormente, se realiza la descomposición armónica, calculando los valores de la

corriente en un número adecuado de puntos dentro de un período y aplicando la transformada rápida de Fourier.

En este caso, se tendrá una onda de dos tramos, ya que la del otro semiperiodo podrá obtenerse a partir de este. En todos los tramos se cumple:

$$u(t) = \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} \cdot U_h \cos(h\omega t + \varphi_{Uh})$$

Ec. 7.44

$$T = \frac{1}{f}$$

Ec. 7.45

$$\omega = 2\pi f$$

Ec. 7.46

Para el tramo 1, las ecuaciones son:

$$t_1 - t_2 \quad \begin{cases} i^{(I)}(t) = 0 \\ u_c^{(I)}(t) = K^{(I)} e^{-\frac{t}{RC}} \end{cases}$$

Ec. 7.47

$$t_3 - t_4 \quad \begin{cases} i^{(III)}(t) = -i^{(I)}\left(t - \frac{T}{2}\right) = 0 \\ u_c^{(III)}(t) = u_c^{(I)}\left(t - \frac{T}{2}\right) \end{cases}$$

Ec. 7.48

Para el tramo 2, hay dos posibles soluciones según el signo del discriminante, teniendo en cuenta las ecuaciones Ec. 7.5, Ec. 7.6, Ec. 7.7, Ec. 7.8 y Ec. 7.9.

$$t_3 = t_1 + \frac{T}{2}$$

Ec. 7.49

En el caso aperiódico

$$t_2 - t_3 \quad \begin{cases} u_c^{(II)}(t) = -K_{21}e^{\mu_1 t} - K_{22}e^{\mu_2 t} - \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2}U_{ch} \cos(h\omega t + \varphi_{ch}) \\ i^{(II)}(t) = K_{1p}K_{21}e^{\mu_1 t} + K_{2p}K_{22}e^{\mu_2 t} + \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2}I_h \cos(h\omega t + \varphi_{Ih}) \end{cases}$$

Ec. 7.50

$$t_4 - t_5 \quad \begin{cases} u_c^{(IV)}(t) = u_c^{(II)}\left(t - \frac{T}{2}\right) \\ i^{(IV)}(t) = -i^{(II)}\left(t - \frac{T}{2}\right) \end{cases}$$

Ec. 7.51

Y para el caso oscilante:

$$t_2 - t_3 \quad \begin{cases} u_c^{(II)}(t) = -K_{21}e^{\mu t} - \cos(\varepsilon t + K_{22}) - \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{\frac{h_{max}+1}{2}} \sqrt{2}U_{ch} \cos(h\omega t + \varphi_{ch}) \\ i^{(II)}(t) = K_{21}e^{\mu t} [K_{pr} \cos(\varepsilon t + K_{22}) - K_{pi} \sin(\varepsilon t + K_{22})] + \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{\frac{h_{max}+1}{2}} \sqrt{2}I_h \cos(h\omega t + \varphi_{Ih}) \end{cases}$$

Ec. 7.52

$$t_4 - t_5 \quad \begin{cases} u_c^{(IV)}(t) = u_c^{(II)}\left(t - \frac{T}{2}\right) \\ i^{(IV)}(t) = -i^{(II)}\left(t - \frac{T}{2}\right) \end{cases}$$

Ec. 7.53

El sistema a resolver dependerá también si la solución es oscilante o aperiódica.

En el caso aperiódico, las ecuaciones son:

$$f_1(t_2) = K_1 e^{-t_2/\tau} + \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_h) = 0$$

Ec. 7.54

$$f_2(t_1) = K_{1p}K_{21}e^{\mu_1\left(t_1+\left(\frac{T}{2}\right)\right)} + K_{2p}K_{22}e^{\mu_2\frac{T}{2}}e^{\mu_2t_1} - \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} I_h \cos(h\omega t_1 + \varphi_{Ih}) = 0$$

Ec. 7.55

En el caso oscilante, encontramos las siguientes ecuaciones:

$$f_1(t_2) = K_1e^{-t_2/\tau} + \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_h) = 0$$

Ec. 7.56

$$f_2(t_1) = K_{21}e^{\mu_2\frac{T}{2}}e^{\mu_2t_1} \left[K_{pr} \cos\left(\varepsilon\left(t_1 + \frac{T}{2}\right) + K_{22}\right) - K_{pi} \sin\left(\varepsilon\left(t_1 + \frac{T}{2}\right) + K_{22}\right) \right] - \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} I_h \cos(h\omega t_1 + \varphi_{Ih}) = 0$$

Ec. 7.57

siendo

$$\tau = RC$$

Ec. 7.58

Las constantes para el caso aperiódico son:

$$K_{21} = \frac{1}{(K_{2p} - K_{1p})e^{\lambda_1 t_2}} \left[\sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} I_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_{Ih}) + K_{2p} \left(\sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_h) - \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} U_{ch} \cos(h\omega t_2 + \varphi_{ch}) \right) \right]$$

Ec. 7.59

$$K_{22} = \frac{1}{(K_{1p} - K_{2p})e^{\lambda_2 t_2}} \left[\sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} I_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_{Ih}) \right. \\ \left. + K_{1p} \left(\sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_h) \right. \right. \\ \left. \left. - \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} U_{Ch} \cos(h\omega t_2 + \varphi_{Ch}) \right) \right]$$

Ec. 7.60

$$K_1 = e^{\frac{t_1}{\tau}} \left(-K_{21} e^{\lambda_1 \left(t_1 + \left(\frac{T}{2} \right) \right)} - K_{22} e^{\lambda_2 \left(t_1 + \left(\frac{T}{2} \right) \right)} + \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} U_{Ch} \cos(h\omega t_1 + \varphi_{Ch}) \right)$$

Ec. 7.61

Y para el caso oscilante, tomando:

$$\underline{K}_{22} = K_{21} |K_{22} = K_{21} \cos K_{22} + j K_{21} \sin K_{22} = K_{2r} + j K_{2i}$$

Ec. 7.62

se tiene:

$$K_{2r} = \frac{e^{-\mu t_2}}{K_{pi}} \left[(K_{pr} \sin(\epsilon t_2) \right. \\ \left. + K_{pi} \cos(\epsilon t_2)) \left(\sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_h) \right. \right. \\ \left. \left. - \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} U_{Ch} \cos(h\omega t_2 + \varphi_{Ch}) \right) + \sin(\epsilon t_2) \sum_{h=1}^{h_{max}} \sqrt{2} I_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_{Ih}) \right]$$

Ec. 7.63

$$K_{2i} = \frac{e^{-\mu t_2}}{K_{pi}} \left[\left(K_{pr} \cos(\epsilon t_2) - K_{pi} \sin(\epsilon t_2) \right) \left(\sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} U_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_h) - \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} U_{ch} \cos(h\omega t_2 + \varphi_{ch}) \right) + \cos(\epsilon t_2) \sum_{h=1}^{h_{max}} \sqrt{2} I_h \cos(h\omega t_2 + \varphi_{Ih}) \right]$$

Ec. 7.64

$$K_1 = e^{\frac{t_1}{\tau}} \left(K_{21} e^{\mu \left(t_1 + \left(\frac{T}{2} \right) \right)} \cos \left(\epsilon \left(t_1 + \frac{T}{2} \right) + K_{22} \right) - \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} \sqrt{2} U_{ch} \cos(h\omega t_1 + \varphi_{ch}) \right)$$

Ec. 7.65

Con la elección inicial que ya estudiamos en el apartado anterior, se procede a la descomposición armónica. La descomposición de la onda de intensidad, dada la simetría, tendrá sólo armónicos impares.

Para el caso aperiódico ($D > 0$)

$$A_{nH} = \int (K_{1p} K_{21} e^{\lambda_1 t} + K_{2p} K_{22} e^{\lambda_2 t}) \cos(n\omega t) dt$$

Ec. 7.66

$$A_{nH} = \frac{K_{1p} K_{21} e^{\lambda_1 t} (\lambda_1 \cos n\omega t + n\omega \sin n\omega t)}{\lambda_1^2 + n^2 \omega^2} + \frac{K_{2p} K_{22} e^{\lambda_2 t} (\lambda_2 \cos n\omega t + n\omega \sin n\omega t)}{\lambda_2^2 + n^2 \omega^2}$$

Ec. 7.67

$$A_{nP} = \int \sqrt{2} I_h \cos(h\omega t + \varphi_{Ih}) \cos(n\omega t) dt$$

Ec. 7.68

$$A_{nP} = \sqrt{2} I_h \left(\frac{\sin(h\omega t + \varphi_{Ih} - n\omega t)}{2\omega(h-n)} + \frac{\sin(h\omega t + \varphi_{Ih} + n\omega t)}{2\omega(h+n)} \right) \quad h \neq n$$

Ec. 7.69

$$A_{nP} = \sqrt{2}I_h \left(\frac{t \cos \varphi_{Ih}}{2} + \frac{\sin(2n\omega t + \varphi_{Ih})}{4n\omega} \right) \quad h = n$$

Ec. 7.70

$$B_{nH} = \int (K_{1p}K_{21}e^{\lambda_1 t} + K_{2p}K_{22}e^{\lambda_2 t}) \sin(n\omega t) dt$$

Ec. 7.71

$$B_{nH} = \frac{K_{1p}K_{21}e^{\lambda_1 t}(\lambda_1 \sin n\omega t - n\omega \cos n\omega t)}{\lambda_1^2 + n^2\omega^2} + \frac{K_{2p}K_{22}e^{\lambda_2 t}(\lambda_2 \sin n\omega t - n\omega \cos n\omega t)}{\lambda_2^2 + n^2\omega^2}$$

Ec. 7.72

$$B_{nP} = \int \sqrt{2}I_h \cos(h\omega t + \varphi_{Ih}) \sin(n\omega t) dt$$

Ec. 7.73

$$B_{nP} = \sqrt{2}I_h \left(\frac{-\cos(h\omega t + \varphi_{Ih} + n\omega t)}{2\omega(h+n)} + \frac{\cos(h\omega t + \varphi_{Ih} - n\omega t)}{2\omega(h-n)} \right) \quad h \neq n$$

Ec. 7.74

$$B_{nP} = \sqrt{2}I_h \left(\frac{-\cos(2n\omega t + \varphi_{Ih})}{4n\omega} - \frac{t \sin \varphi_{Ih}}{2} \right) \quad h = n$$

Ec. 7.75

Así pues, tendremos que las componentes serán (sólo para n impar)

$$a_n = \frac{4}{T} \left[A_{nH} \left(t_1 + \frac{T}{2} \right) + \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} A_{nP} \left(t_1 + \frac{T}{2} \right) - A_{nH}(t_2) - \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} A_{nP}(t_2) \right]$$

Ec. 7.76

$$b_n = \frac{4}{T} \left[B_{nH} \left(t_1 + \frac{T}{2} \right) + \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} B_{nP} \left(t_1 + \frac{T}{2} \right) - B_{nH}(t_2) - \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} B_{nP}(t_2) \right]$$

Ec. 7.77

y, entonces:

$$\underline{I}_n = I_n |\Psi_n| = \frac{1}{\sqrt{2}} (a_n - j b_n)$$

Ec. 7.78

Para el caso oscilante ($D < 0$)

$$A_{nP} = \int \sqrt{2} I_h \cos(h\omega t + \varphi_{Ih}) \cos(n\omega t) dt$$

Ec. 7.79

$$A_{nP} = \sqrt{2} I_h \left(\frac{\sin(h\omega t + \varphi_{Ih} - n\omega t)}{2\omega(h-n)} + \frac{\sin(h\omega t + \varphi_{Ih} + n\omega t)}{2\omega(h+n)} \right) \quad h \neq n$$

Ec. 7.80

$$A_{nP} = \sqrt{2} I_h \left(\frac{t \cos \varphi_{Ih}}{2} + \frac{\sin(2n\omega t + \varphi_{Ih})}{4n\omega} \right) \quad h = n$$

Ec. 7.81

$$A_{nH} = \int K_{21} e^{\mu t} [K_{pr} \cos(\epsilon t + K_{22}) - K_{pi} \sin(\epsilon t + K_{22})] \cos n\omega t dt$$

Ec. 7.82

$$A_{nH} = \frac{K_{21} e^{\mu t}}{2} \left[\frac{K_{pr}}{\mu^2 + (\epsilon - n\omega)^2} [\mu \cos((\epsilon - n\omega)t + K_{22}) + (\epsilon - n\omega) \sin((\epsilon - n\omega)t + K_{22})] \right. \\ + \frac{K_{pr}}{\mu^2 + (\epsilon + n\omega)^2} [\mu \cos((\epsilon + n\omega)t + K_{22}) + (\epsilon + n\omega) \sin((\epsilon + n\omega)t + K_{22})] \\ - \frac{K_{pi}}{\mu^2 + (\epsilon + n\omega)^2} [\mu \sin((\epsilon + n\omega)t + K_{22}) - (\epsilon + n\omega) \cos((\epsilon + n\omega)t + K_{22})] \\ \left. - \frac{K_{pi}}{\mu^2 + (\epsilon - n\omega)^2} [\mu \sin((\epsilon - n\omega)t + K_{22}) - (\epsilon - n\omega) \cos((\epsilon - n\omega)t + K_{22})] \right]$$

Ec. 7.83

$$B_{nP} = \int \sqrt{2} I_h \cos(h\omega t - \varphi_{Ih}) \sin(n\omega t) dt$$

Ec. 7.84

$$B_{nP} = \sqrt{2} I_h \left(\frac{-\cos(h\omega t + \varphi_{Ih} + n\omega t)}{2\omega(h+n)} + \frac{\cos(h\omega t + \varphi_{Ih} - n\omega t)}{2\omega(h-n)} \right) \quad h \neq n$$

Ec. 7.85

$$B_{nP} = \sqrt{2}I_h \left(\frac{-\cos(2n\omega t + \varphi_{Ih})}{4n\omega} - \frac{t \sin \varphi_{Ih}}{2} \right) \quad h = n$$

Ec. 7.86

$$B_{nH} = \int K_{21} e^{\mu t} [K_{pr} \cos(\epsilon t + K_{22}) - K_{pi} \sin(\epsilon t + K_{22})] \sin n\omega t dt$$

Ec. 7.87

$$B_{nH} = \frac{K_{21} e^{\mu t}}{2} \left[\frac{K_{pr}}{\mu^2 + (\epsilon + n\omega)^2} [\mu \sin((\epsilon + n\omega)t + K_{22}) - (\epsilon + n\omega) \cos((\epsilon + n\omega)t + K_{22})] \right. \\ - \frac{K_{pr}}{\mu^2 + (\epsilon - n\omega)^2} [\mu \sin((\epsilon - n\omega)t + K_{22}) - (\epsilon - n\omega) \cos((\epsilon - n\omega)t + K_{22})] \\ - \frac{K_{pi}}{\mu^2 + (\epsilon - n\omega)^2} [\mu \cos((\epsilon - n\omega)t + K_{22}) + (\epsilon - n\omega) \sin((\epsilon - n\omega)t + K_{22})] \\ \left. + \frac{K_{pi}}{\mu^2 + (\epsilon + n\omega)^2} [\mu \cos((\epsilon + n\omega)t + K_{22}) + (\epsilon + n\omega) \sin((\epsilon + n\omega)t + K_{22})] \right]$$

Ec. 7.88

Así se obtiene que las componentes serán (sólo para n impar)

$$a_n = \frac{4}{T} \left[A_{nH} \left(t_1 + \frac{T}{2} \right) + \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} A_{nP} \left(t_1 + \frac{T}{2} \right) - A_{nH}(t_2) - \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} A_{nP}(t_2) \right]$$

Ec. 7.89

$$b_n = \frac{4}{T} \left[B_{nH} \left(t_1 + \frac{T}{2} \right) + \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} B_{nP} \left(t_1 + \frac{T}{2} \right) - B_{nH}(t_2) - \sum_{\substack{i=1 \\ h=2i-1}}^{(h_{max}+1)/2} B_{nP}(t_2) \right]$$

Ec. 7.90

y, entonces:

$$I_n = I_n |\Psi_n = \frac{1}{\sqrt{2}} (a_n - j b_n)$$

Ec. 7.91



8. Flujo armónico de cargas y herramientas de cálculo

La calidad del suministro eléctrico mide si la forma de onda de las tensiones que proporcionan las compañías suministradoras al usuario está dentro de los márgenes establecidos. En un hipotético caso en el cual la calidad de potencia es ideal, contemplaríamos senoides perfectas de tensión y corriente, ambas en de frecuencia constante y de amplitud también constante. Como esto no es la realidad, se establecen unas normas para que el usuario obtenga una alimentación de calidad.

Debido al incremento de cargas no lineales en las redes eléctricas existe una preocupación por la calidad del suministro. De estos elementos, podemos destacar los equipos electrónicos (equipos de control, variadores de velocidad de motores, equipos informáticos, ...) y las lámparas de descarga que cada día tienen más presencia e importancia. Las perturbaciones provocadas pueden llevar a pérdidas económicas en mayor o menor grado.

Como hemos mencionado anteriormente, las leyes y principios de la corriente alterna se consideran las tensiones y corrientes senoidales y misma frecuencia para facilitar el cálculo. En el caso que en el circuito las cargas sean resistivas, inductivas, capacitivas y sus combinaciones pueden considerarse lineales.

En la práctica, existen numerosos casos en el que no son senoidales y se encuentran distorsiones. Circuitos que tengan componentes no lineales (diodos, transistores, tiristores, ...) o cargas que absorben intensidades senoidales al ser alimentadas con tensión senoidal, pero a la hora de duplicar el valor eficaz de la tensión no se obtenga el de la intensidad. Algunos ejemplos de ondas distorsionadas se encuentran en cargas no lineales como la fuente de alimentación o el del fluorescente. Viendo la problemática que suponen los armónicos a la red se ha desarrollado el estudio del flujo armónico de cargas que permite calcular la tensión fundamental y armónica de todos los nudos de la red.

8.1. Flujo armónico de cargas

Los estudios del flujo armónico de cargas se pueden dividir en dos grupos dependiendo del procedimiento en el que se analiza. Estos son el tiempo o el dominio de la frecuencia. Existe también un tercer grupo, el cual consiste en un híbrido entre ambos dominios para aprovechar las ventajas de los dos campos.

El flujo armónico de cargas es una modificación del flujo de cargas fundamental en la que se incluyen los elementos no lineales y los voltajes armónicos. Existen diferentes formulaciones del flujo armónico

de cargas y los buses se clasifican en tres grupos: *Slack* o de referencia ($i=1$), *PQ* ($i=2, \dots, c$) y los buses con cargas no lineales *NL* ($i=c+1, \dots, n$). Para no complicar el análisis no se incluyen los buses *PV*.

En este trabajo, se estudia la formulación más sencilla del dominio de la frecuencia que corresponde a la penetración armónica (*HP, Harmonic Penetration*). Se deben contemplar otros datos como las tensiones fundamentales y armónicos de los nudos y los parámetros que caracterizan los dispositivos no lineales.

8.1.1. Formulación del flujo armónico de cargas: penetración armónica

En el método de la penetración armónica, se trabaja la hipótesis de no considerar la interacción armónica entre la red y los elementos no lineales. Esta formulación considera que el comportamiento de las cargas no lineales sólo depende de las tensiones fundamentales y de sus propias variables de estado, y por lo tanto se crea un flujo de cargas fundamental modificado (*FLFm*). Esta hipótesis es aplicable también a la potencia. Para un nudo i del sistema, $S_i = \underline{V}_i^1 \cdot (\underline{I}_i^1)^*$, donde \underline{V}_i^1 e \underline{I}_i^1 son la tensión y la intensidad fundamental respectivamente del nudo i .

Las tensiones armónicas se calculan mediante el método de los nudos (*VN, Voltage Nodes*), haciendo uso de la matriz de admitancias y la inyección de las intensidades armónicas. En la siguiente figura se muestra de manera gráfica, el diagrama de flujo de las etapas del método de la penetración armónica, así como la tabla con los datos e incógnitas asociados a dicha formulación.

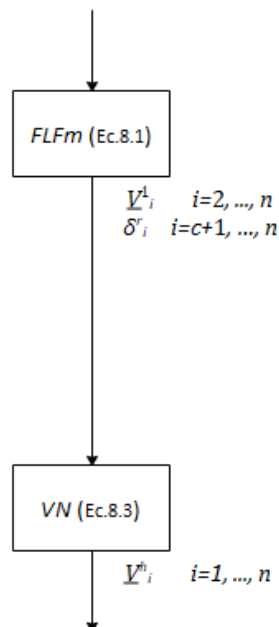


Figura 8.1 Ilustración del método de la penetración armónica (*HP*)

| Formulación | Etapas | Bus | Datos | Incógnitas |
|-------------|--------|-------|--|---------------------------------|
| HP | FLFm | Slack | \underline{V}_1^1 | --- |
| | | PQ | P_i, Q_i | \underline{V}_i^1 |
| | | NL | D_i^m | $\underline{V}_i^1, \delta_i^r$ |
| | VN | Slack | X_1^1 | \underline{V}_1^h |
| | | PQ | $\underline{Y}_i^h = f_{Y_i}^h(\underline{V}_i^1)$ | \underline{V}_i^h |
| | | NL | \underline{I}_i^h | \underline{V}_i^h |

Tabla 16. Datos e incógnitas del flujo armónico de cargas con la formulación HP

En el flujo de cargas fundamental modificado (FLFm), las ecuaciones son:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{S}_i = \underline{V}_i^1 \cdot \left(\sum_{j=1}^n \underline{Y}_{ij}^1 \cdot \underline{V}_j^1 \right)^* \quad (i = 2, \dots, c) \\ \underline{V}_i^1 \cdot (\underline{I}_i^1)^* = \underline{V}_i^1 \cdot \left(\sum_{j=1}^n \underline{Y}_{ij}^1 \cdot \underline{V}_j^1 \right)^* \quad (i = c + 1, \dots, n) \\ nl_i^r(\underline{V}_i^1, \delta_i^r, D_i^m) = 0 \quad (i = c + 1, \dots, n; \quad r = 1, \dots, r_{max}; \quad m = 1, \dots, m_{max}) \end{array} \right.$$

Ec. 8.1

Donde \underline{Y}_{ij}^1 son los elementos ij^{th} de la matriz de admitancia de \mathbf{Y}_B^1 , y $nl_i^r(\cdot) = 0$ representan las ecuaciones de las cargas no lineales. Estas ecuaciones dependen de D_i^m (datos de las cargas no lineales) y δ_i^r (incógnitas de las cargas no lineales). Las corrientes fundamentales inyectadas por las cargas no lineales se expresan:

$$\underline{I}_i^1 = \underline{f}_i^1(\underline{V}_i^1, \delta_i^r, D_i^m) \quad (i = c + 1, \dots, n; \quad r = 1, \dots, r_{max}; \quad m = 1, \dots, m_{max})$$

Ec. 8.2

El método VN se basa en resolución del sistema lineal:

$$\mathbf{Y}_B^h \cdot \mathbf{V}_B^h = \mathbf{I}_B^h$$

Ec. 8.3

Donde las corrientes armónicas inyectadas \underline{I}_i^h en los nudos NL ($i=c+1, \dots, n$) se incorporan al vector corrientes \underline{I}_B^h y las admitancias armónicas \underline{Y}_i^h en los buses Slack y PQ ($i=1, \dots, c$) se incorporan a la matriz de admitancias de red \underline{Y}_B^h . Estas se determinan como:

$$\underline{I}_i^h = \underline{f}_i^h(\underline{V}_i^1, \delta_i^r, D_i^m) \quad (i = c + 1, \dots, n; r = 1, \dots, r_{max}; m = 1, \dots, m_{max})$$

Ec. 8.4

$$\underline{Y}_1^h = \frac{1}{R_1 + j \cdot h \cdot X_1^1}; R_1 \approx \frac{X_1^1}{20}$$

Ec. 8.5

$$\underline{Y}_i^h = -\frac{\underline{S}_i^*}{(V_i^1)^2} = \underline{f}_{Yi}^1(V_i^1); \underline{Y}_i^h = \underline{F}_{Yi}^h(\underline{Y}_i^1) \rightarrow \underline{Y}_i^h = \underline{f}_{Yi}^h(V_i^1) \quad (i = 2, \dots, c)$$

Ec. 8.6

8.1.2. Resolución del flujo armónico de cargas: penetración armónica

El proceso de resolución del flujo armónico de cargas en redes eléctricas con presencia de nudos con cargas no lineales aplicando el método de la penetración armónica se divide en dos etapas, como se muestra en la Figura 8.1. Esas dos etapas diferenciadas, se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. Clasificación de los buses de la red (*Slack, PQ, NL*). A partir de los datos y las incógnitas de cada bus, clasificamos cada uno de ellos.
2. Cálculo de la matriz de admitancias de bus para cada armónico. A partir de los datos de la red eléctrica, sus parámetros y la estructura de conexión.
3. Determinación de las tensiones fundamentales mediante resolución numérica del flujo de cargas fundamental modificado (*FLFm*).
4. Uso del método de los nudos (*VN, Voltage Nodes*) a partir del cual obtenemos las tensiones armónicas.

Para el cálculo de las tensiones de bus fundamentales mediante el flujo de cargas fundamental modificado y la obtención de las tensiones armónicas con el método de los nudos (*VN*), usamos las ecuaciones que mencionamos en el apartado anterior.

8.2. Herramientas de cálculo

Si el caso del flujo de cargas fundamental, en algunos casos, nos podría llevar tiempo para resolver la red, el cálculo del flujo de potencia con armónicos eleva mucho la cantidad de cálculos y de iteraciones para resolver el problema. Para ello, se vuelven a utilizar programas de cálculo matemático que facilitan el proceso de resolución y limitan el error de ellos. A continuación, se muestran las herramientas de cálculo que se incluyen en este trabajo.

8.2.1. MATLAB

MATLAB es el programa de software matemático también utilizado en el caso de flujo de cargas fundamental. En este caso, se resuelve un ejercicio planteado en el siguiente apartado y resolveremos con dicha herramienta para comparar con los resultados obtenidos con la otra herramienta de cálculo utilizado para este caso, MATPOWER.

8.2.2. MATPOWER

MATPOWER es un paquete de MATLAB para resolver y optimizar flujos de cargas. Actualmente, no cuenta con soporte para resolver flujos armónicos de cargas. En este trabajo, se añadirá un caso de estudio de un flujo armónico de cargas y los archivos necesarios para hacer que MATPOWER pueda gestionar y resolver este tipo de casos con cargas no lineales aplicando la formulación *HP*.



9. Adecuación de MATPOWER para estudios de flujo armónico de cargas

En este apartado se especificarán las modificaciones que se ha de implementar en MATPOWER para el estudio de los flujos armónicos de cargas mediante MATLAB.

Se utilizarán los mismos formatos implementados por MATPOWER, incluyendo en la estructura “*mpc*”. En primer lugar, se añaden los campos referentes a los buses, luego referente a los generadores y por último referente a las líneas y las conexiones entre ellas.

Posteriormente, utilizaremos ficheros en MATLAB, leeremos los datos introducidos en MATPOWER y resolveremos el flujo armónico de cargas. Para ello, se hace uso de diferentes funciones.

La función “*makeYbus*” crea y determina la matriz de admitancia [Y_{bus}] del caso de estudio. Recibe como parámetros de entrada lo que se define en la estructura “*mpc*”. La función principal consiste en calcular de forma más ordenada y limpia para las h frecuencias armónicas cada una de las admitancias de los componentes del sistema.

Las admitancias de ramas y los elementos shunt se introducen de la misma manera que en el caso de flujo de cargas fundamental que ya se explicó en los apartados anteriores. Se puede observar en el volumen anexo (apartado C6) el fichero *case1_HP*, y se puede comparar con el fichero del apartado A2 del mismo volumen anexo donde se expone la programación en MATPOWER para resolver el ejemplo del flujo de cargas fundamental.

La lectura y adecuación de datos permite ordenar de forma más simple todos los datos de las ramas, generadores y buses. Se utiliza la función propia de MATPOWER “*loadcase*” que carga del caso seleccionado y estructura la matriz de datos.

A continuación, se implementará un caso de estudio de flujo armónico de cargas mediante el método de la penetración armónica en MATPOWER, mediante estas funciones explicadas.



10. Implementación de un caso de estudio de flujo armónico de cargas

En este apartado, resolveremos un caso diferente al ya resuelto en el apartado 5 de este mismo documento. El caso de estudio está extraído del documento [10]. Este caso de estudio incluye un nudo no lineal donde veremos el planteamiento y la solución con algunas de las herramientas de cálculo utilizado para el cálculo de flujo de cargas fundamental. En concreto, en este apartado resolveremos el caso de estudio mediante el método de penetración armónica con el programa anteriormente utilizado MATLAB y adecuaremos la extensión MATPOWER con los programas necesarios para hacer que esta útil herramienta pueda resolver este mismo caso.

10.1. Descripción del caso de estudio

El ejercicio de estudio es una red de tres buses, una unidad generadora, sin transformadores entre buses, con una carga capacitiva y cuenta con la siguiente distribución:

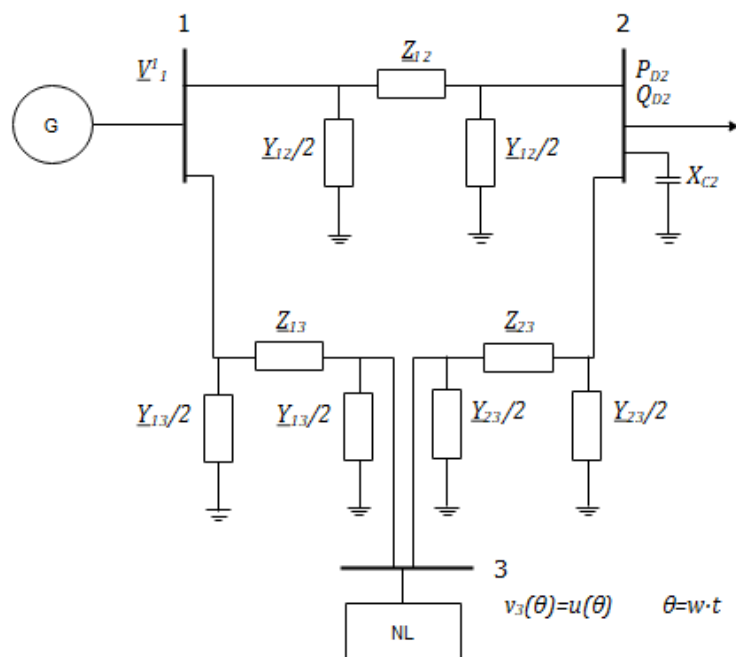


Figura 10.1 Esquema de la red

En el nudo no lineal habrá conectada una fuente de alimentación monofásica formada por un rectificador ideal en puente con un condensador de filtro (X_C) que alimenta a una carga representada como una resistencia (R_D) teniendo en cuenta la resistencia y reactancia presentes en la red (R y X_L). A continuación, mostramos la representación gráfica y los datos proporcionados respetivamente:

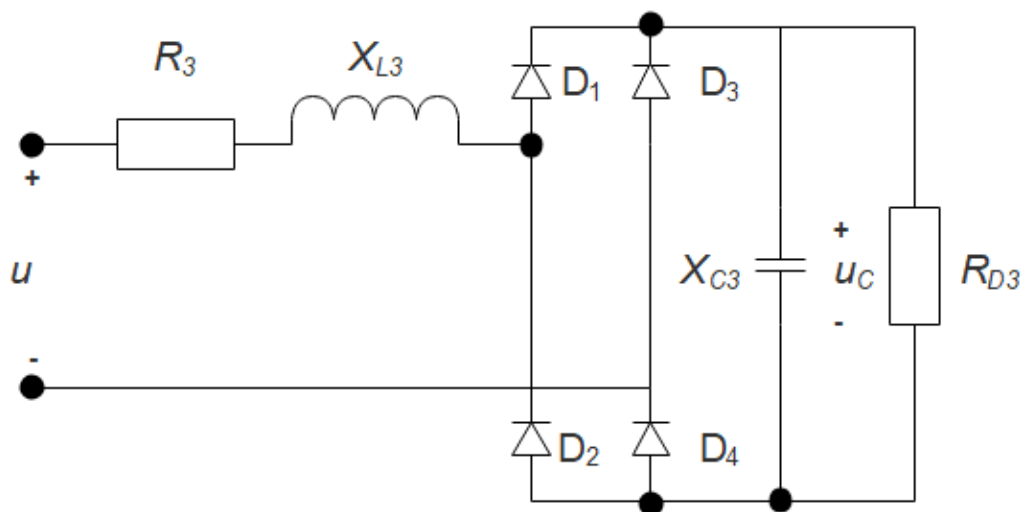


Figura 10.2 Circuito de la carga no lineal conectada al bus 3

| Elemento | Núm. | Tipo | Datos | Valor (p.u.) |
|----------|------|-------------|--|---|
| Bus | 1 | Slack | \underline{V}_1^1, X_1^1 | $1 \angle 0^\circ, 4.6168\text{e-}3$ |
| | 2 | PQ | $P_2 = -P_{D2}, Q_2 = -Q_{D2}$ | -0.8, -0.6 |
| | 3 | NL | $R_3, X_{L3}, X_{C3}, R_{D3}$ | 0.0207, 0.0130, 1.1579, 11.0021 |
| Shunt | 2-0 | Condensador | X_{C2} | 1.6667 |
| Red | 1-2 | Línea | $\underline{Z}_{12}, \underline{Y}_{12}$ | $5.1653\text{e-}4 + j5.1653\text{e-}3, j6.4533\text{e-}3$ |
| | 2-3 | Línea | $\underline{Z}_{23}, \underline{Y}_{23}$ | $5.1653\text{e-}4 + j5.1653\text{e-}3, j6.4533\text{e-}3$ |
| | 1-3 | Línea | $\underline{Z}_{13}, \underline{Y}_{13}$ | $5.1653\text{e-}4 + j5.1653\text{e-}3, j6.4533\text{e-}3$ |

Tabla 17 Datos y valores del caso de estudio del flujo armónico de cargas

Los valores base $S_B=2500$ VA y $V_B=220$ V son los adoptados para obtener los valores reducidos a p.u. de la Tabla 17 y la frecuencia fundamental $f=50$ Hz es la asociada a los datos indicados en dicha tabla.

La finalidad es obtener los voltajes armónicos de los diferentes buses. Los parámetros principales que definen el comportamiento de las cargas no lineales son los tiempos de conmutación que pudimos observar en Figura 7.2. Las corrientes fundamental y armónicas del nudo no lineal del caso de estudio se rigen por:

$$\underline{I}_3^k = \underline{f}_3^k(\underline{V}_3^1, \underline{V}_3^h, t_3^1, t_3^2, R_3, X_{L3}, X_{C3}, R_{D3})$$

Ec. 10.1

Donde $k=1, 3, 5, 7, 9, \dots$ y se describe \underline{f}_3^k en [8, 9].

La matriz de admitancia es una matriz cuadrada y simétrica. La matriz de admitancia fundamental es:

$$\mathbf{Y}_B^1 = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11}^1 & \underline{Y}_{12}^1 & \underline{Y}_{13}^1 \\ \underline{Y}_{21}^1 & \underline{Y}_{22}^1 & \underline{Y}_{23}^1 \\ \underline{Y}_{31}^1 & \underline{Y}_{32}^1 & \underline{Y}_{33}^1 \end{bmatrix}$$

Ec. 10.2

Cada elemento de la matriz de admitancia es:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{11}^1 &= \frac{1}{\underline{Z}_{12}^1} + \frac{\underline{Y}_{12}^1}{2} + \frac{\underline{Y}_{13}^1}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_{13}^1} \\ \underline{Y}_{22}^1 &= \frac{1}{\underline{Z}_{12}^1} + \frac{\underline{Y}_{12}^1}{2} + \frac{\underline{Y}_{23}^1}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_{23}^1} + \underline{Y}_{C2}^1 \\ \underline{Y}_{33}^1 &= \frac{1}{\underline{Z}_{13}^1} + \frac{\underline{Y}_{13}^1}{2} + \frac{\underline{Y}_{23}^1}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_{23}^1} \\ \underline{Y}_{12}^1 &= -\frac{1}{\underline{Z}_{12}^1}, \underline{Y}_{13}^1 = -\frac{1}{\underline{Z}_{13}^1}, \underline{Y}_{23}^1 = -\frac{1}{\underline{Z}_{23}^1} \\ \underline{Y}_{21}^1 &= \underline{Y}_{12}^1, \underline{Y}_{31}^1 = \underline{Y}_{13}^1, \underline{Y}_{32}^1 = \underline{Y}_{23}^1 \end{aligned}$$

Ec. 10.3

Para la formulación del método de la penetración armónica, los datos y las incógnitas de las dos etapas se resume en la siguiente tabla:

| Etap | Tipo | Datos | Incógnitas | Núm. de incógnitas |
|------|-------|--|-------------------------------|--------------------|
| FLFm | Slack | \underline{V}_1 | --- | 0 |
| | PQ | P_2, Q_2 | \underline{V}_2 | 2 |
| | NL | $R_3, X_{L3},$ X_{C3}, R_{D3} | $\underline{V}_3, t_3, t_3^2$ | 4 |
| VN | Slack | X_1 | \underline{V}_1^h | 18 |
| | PQ | $\underline{Y}_2^h = \underline{f}_{Y_2}^h(\underline{V}_2^1)$ | \underline{V}_2^h | 18 |
| | NL | \underline{I}_3^h | \underline{V}_3^h | 18 |

Tabla 18 Datos e incógnitas del flujo armónico de cargas con la formulación HP aplicada a la red de la Figura 10.1

La etapa FLFm se resuelve mediante el siguiente sistema de ecuaciones no lineales:

$$\begin{aligned}
\text{Re}\{\underline{V}_2^1(\underline{Y}_{21}^1 \underline{V}_1^1 + \underline{Y}_{22}^1 \underline{V}_2^1 + \underline{Y}_{23}^1 \underline{V}_3^1)^*\} - P_2 &= 0 \\
\text{Im}\{\underline{V}_2^1(\underline{Y}_{21}^1 \underline{V}_1^1 + \underline{Y}_{22}^1 \underline{V}_2^1 + \underline{Y}_{23}^1 \underline{V}_3^1)^*\} - Q_2 &= 0 \\
\text{Re}\{\underline{V}_3^1(\underline{Y}_{31}^1 \underline{V}_1^1 + \underline{Y}_{32}^1 \underline{V}_2^1 + \underline{Y}_{33}^1 \underline{V}_3^1)^*\} - \text{Re}\{\underline{V}_3^1(\underline{I}_3^1)^*\} &= 0 \\
\text{Im}\{\underline{V}_3^1(\underline{Y}_{31}^1 \underline{V}_1^1 + \underline{Y}_{32}^1 \underline{V}_2^1 + \underline{Y}_{33}^1 \underline{V}_3^1)^*\} - \text{Im}\{\underline{V}_3^1(\underline{I}_3^1)^*\} &= 0 \\
nl_3^1(\underline{V}_3^1, t_3^1, t_3^2, R_3, X_{L3}, X_{C3}, R_{D3}) &= 0 \\
nl_3^2(\underline{V}_3^1, t_3^1, t_3^2, R_3, X_{L3}, X_{C3}, R_{D3}) &= 0
\end{aligned}$$

Ec. 10.4

donde nl_3^1 y nl_3^2 se describen en [8, 9]. La corriente fundamental en el nudo 3 es:

$$\underline{I}_3^1 = \underline{f}_3^1(\underline{V}_3^1, t_3^1, t_3^2, R_3, X_{L3}, X_{C3}, R_{D3})$$

Ec. 10.5

Mediante el método de los nudos (VN) se obtienen los voltajes armónicos. De la Ec. 8.3 obtenemos:

$$\mathbf{V}_B^h = (\mathbf{Y}_B^h)^{-1} \cdot \mathbf{I}_B^h$$

Ec. 10.6

donde \mathbf{V}_B^h es el siguiente vector de voltajes:

$$\mathbf{V}_B^h = \begin{bmatrix} \underline{V}_1^h \\ \underline{V}_2^h \\ \underline{V}_3^h \end{bmatrix}$$

Ec. 10.7

La matriz de admitancias se modifica integrando las admitancias de la línea para cada armónico:

$$\mathbf{Y}_B^h = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11}^h & \underline{Y}_{12}^h & \underline{Y}_{13}^h \\ \underline{Y}_{21}^h & \underline{Y}_{22}^h & \underline{Y}_{23}^h \\ \underline{Y}_{31}^h & \underline{Y}_{32}^h & \underline{Y}_{33}^h \end{bmatrix}$$

Ec. 10.8

Cada elemento que constituye la matriz se determina mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{11}^h &= \frac{1}{\underline{Z}_{12}^h} + \frac{\underline{Y}_{12}^h}{2} + \frac{\underline{Y}_{13}^h}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_{13}^h} + \underline{Y}_1^h \\ \underline{Y}_{22}^h &= \frac{1}{\underline{Z}_{12}^h} + \frac{\underline{Y}_{12}^h}{2} + \frac{\underline{Y}_{23}^h}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_{23}^h} + \underline{Y}_{C2}^h + \underline{Y}_2^h \\ \underline{Y}_{33}^h &= \frac{1}{\underline{Z}_{13}^h} + \frac{\underline{Y}_{13}^h}{2} + \frac{\underline{Y}_{23}^h}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_{23}^h} \\ \underline{Y}_{12}^h &= -\frac{1}{\underline{Z}_{12}^h}, \underline{Y}_{13}^h = -\frac{1}{\underline{Z}_{13}^h}, \underline{Y}_{23}^h = -\frac{1}{\underline{Z}_{23}^h} \\ \underline{Y}_{21}^h &= \underline{Y}_{12}^h, \underline{Y}_{31}^h = \underline{Y}_{13}^h, \underline{Y}_{32}^h = \underline{Y}_{23}^h \end{aligned}$$

Ec. 10.9

La admitancia armónica que modela el bus Slack es:

$$\underline{Y}_1^h = \frac{1}{R_1 + j \cdot h \cdot X_1^1}, R_1 \approx \frac{X_1^1}{20}$$

Ec. 10.10

La admitancia armónica que modela la carga PQ se calculan según la siguiente expresión:

$$\underline{Y}_2^h = \frac{1}{R_2 + j \cdot h \cdot X_2^1}; R_2 + jX_2^1 = \frac{1}{\underline{Y}_2^1}, \underline{Y}_2^1 = -\frac{(P_2 + jQ_2)^*}{(V_2^1)^2}, \underline{Y}_{C2}^h = \frac{1}{-j \cdot \frac{X_{C2}}{h}}$$

Ec. 10.11

Asimismo, la fuente de alimentación se sustituye por el vector de corriente armónica:

$$\underline{I}_B^h = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \underline{I}_3^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_3^h(\underline{V}_3^1, t_3^1, t_3^2, R_3, X_{L3}, X_{C3}, R_{D3}) \end{bmatrix}$$

Ec. 10.12

10.2. Resolución con MATLAB

La programación de la resolución con MATLAB trata de varios ficheros. Consta de un fichero base que llama a la vez a los demás ficheros para resolver el flujo armónico. Este primer fichero plantea los datos del ejercicio y resuelve el flujo de cargas fundamental modificado del método de la penetración armónica. Este fichero llama a tres programas troncales para poder resolver el primer punto. Entre ellos, llama a un fichero con el comando “*fsolve*”, el cual resuelve y genera los voltajes fundamentales y los tiempos de conmutación. Esta función resuelve un sistema de ecuaciones no lineales. Utiliza el algoritmo Levenberg-Marquardt se basa en los algoritmos no lineales de los mínimo-cuadrados y la tolerancia de error predeterminada es de 1e-6.

Una vez obtenidos, llama al fichero que resuelve el método de los nudos (VN) y que, a través de su programación, obtenemos los voltajes e intensidades armónicas de cada uno de estos nudos. En este punto se trabaja con la serie de Fourier que consta con un listado de ficheros relacionados entre sí y que dependen del caso que estemos estudiando.

En el volumen anexo a esta memoria, se expone cada uno de los de los programas utilizados junto a un diagrama de flujo el cual representa la conexión que existe entre los ficheros. Los resultados obtenidos con esta herramienta de cálculo son los siguientes:

D =

```
-3.499584207225458e+07
```

Valores iniciales de t:


```
t10 = -1.000000e-04

t20 = 7.809593e-03

x0 =

Columns 1 through 3

    0    1.0000000000000000    0

Columns 4 through 6

    1.0000000000000000   -0.0001000000000000    0.007809592717040

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the default value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

delta2 =

    -0.003035291131055

delta2gr =

    -0.173909371402936

V2ef =

    0.999823667703422

delta3 =

    -0.001934428440522

delta3gr =

    -0.110834585411996

V3ef =
```

1.000033672432795

t1 =

-3.002143526442893e-04

t2 =

0.007935595170873

V1h1 = 1 <0°

V1h3 = 2.241781e-03 <-3.131851e+01°

V1h5 = 3.631882e-03 <8.955692e+00°

V1h7 = 4.931039e-03 <4.885250e+01°

V1h9 = 6.265657e-03 <8.843812e+01°

V1h11 = 8.204463e-03 <1.275512e+02°

V1h13 = 1.484137e-02 <1.653033e+02°

V1h15 = 1.803088e-02 <2.882751e+01°

V1h17 = 2.230111e-03 <6.135102e+01°

V1h19 = 3.679960e-04 <8.210026e+01°

V2h1 = 9.998237e-01 <-1.739094e-01°

V2h3 = 3.099443e-03 <-3.165262e+01°

V2h5 = 5.104984e-03 <8.730864e+00°

V2h7 = 7.111508e-03 <4.866823e+01°

V2h9 = 9.362256e-03 <8.826936e+01°

V2h11 = 1.283896e-02 <1.273851e+02°

V2h13 = 2.462352e-02 <1.651311e+02°

V2h15 = 3.217822e-02 <2.864190e+01°

V2h17 = 4.356946e-03 <6.114395e+01°

```
V2h19 = 8.048268e-04 <8.186149e+01°  
V3h1 = 1.000034e+00 <-1.108346e-01°  
V3h3 = 3.892383e-03 <-3.166729e+01°  
V3h5 = 6.219602e-03 <8.766501e+00°  
V3h7 = 8.259722e-03 <4.873862e+01°  
V3h9 = 1.016245e-02 <8.837508e+01°  
V3h11 = 1.271631e-02 <1.275323e+02°  
V3h13 = 2.158058e-02 <1.653318e+02°  
V3h15 = 2.392177e-02 <2.891828e+01°  
V3h17 = 2.576917e-03 <6.154077e+01°  
V3h19 = 3.384706e-04 <8.248855e+01°
```

Figura 10.3 Resultados del flujo armónico de cargas con MATLAB

10.3. Resolución con MATPOWER

En este apartado se mostrará la solución del ejercicio con la extensión de MATPOWER. Hasta ahora, el programa solo resolvía flujos de cargas fundamentales. Con este ejemplo, se añadirá ficheros para resolver flujos armónicos de cargas mediante el método estudiado en este trabajo, la penetración armónica.

La programación de la resolución con MATPOWER también trata de varios ficheros y una estructuración parecida. Consta de un fichero base que llama a la vez a los demás ficheros para resolver el flujo armónico como en el caso anterior. La diferencia principal es que usamos un fichero llamado “*case1_HP*” el cual utiliza las herramientas de MATPOWER para ahorrar algunos cálculos que hacíamos manualmente en MATLAB. En el cálculo de flujo de cargas fundamental ya vimos la gran utilidad que esta extensión nos ofrecía y las utilizaremos y adecuaremos el programa para poder sacar el máximo rendimiento. También se hace uso de la función “*fsolve*” que incorpora MATLAB, con una tolerancia de error de 1e-6.

En el volumen anexo a esta memoria, se expone cada uno de los de los programas utilizados y un diagrama de flujo como ya hicimos con la otra herramienta de cálculo utilizada. Los resultados obtenidos con esta herramienta de cálculo son los siguientes:

D =

-3.499584207225458e+07

Valores iniciales de t:

t10 = -1.000000e-04

t20 = 7.809593e-03

x0 =

Columns 1 through 3

0 1.0000000000000000 0

Columns 4 through 6

1.0000000000000000 -0.0001000000000000 0.007809592717040

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero

as measured by the default value of the function tolerance, and

the problem appears regular as measured by the gradient.

delta2 =

-0.003035295171008

delta2gr =

-0.173909602875178

V2ef =

0.999823709191532

delta3 =

```
-0.001934430491808

delta3gr =

-0.110834702942027

V3ef =

1.000033693176311

t1 =

-3.002143461148427e-04

t2 =

0.007935595177402

Vlh1 = 1 <0°

Vlh3 = 2.241782e-03 <-3.131851e+01°

Vlh5 = 3.631890e-03 <8.955689e+00°

Vlh7 = 4.931064e-03 <4.885250e+01°

Vlh9 = 6.265726e-03 <8.843811e+01°

Vlh11 = 8.204671e-03 <1.275511e+02°

Vlh13 = 1.484266e-02 <1.653031e+02°

Vlh15 = 1.802677e-02 <2.882674e+01°

Vlh17 = 2.229942e-03 <6.135097e+01°

Vlh19 = 3.679750e-04 <8.210025e+01°

V2h1 = 9.998237e-01 <-1.739096e-01°

V2h3 = 3.099446e-03 <-3.165262e+01°

V2h5 = 5.104998e-03 <8.730860e+00°

V2h7 = 7.111551e-03 <4.866822e+01°
```

```

V2h9 = 9.362376e-03 <8.826935e+01°
V2h11 = 1.283932e-02 <1.273850e+02°
V2h13 = 2.462577e-02 <1.651309e+02°
V2h15 = 3.217107e-02 <2.864113e+01°
V2h17 = 4.356652e-03 <6.114390e+01°
V2h19 = 8.047903e-04 <8.186148e+01°

V3h1 = 1.000034e+00 <-1.108347e-01°
V3h3 = 3.892386e-03 <-3.166729e+01°
V3h5 = 6.219613e-03 <8.766498e+00°
V3h7 = 8.259757e-03 <4.873862e+01°
V3h9 = 1.016255e-02 <8.837507e+01°
V3h11 = 1.271660e-02 <1.275322e+02°
V3h13 = 2.158235e-02 <1.653316e+02°
V3h15 = 2.391613e-02 <2.891751e+01°
V3h17 = 2.576684e-03 <6.154074e+01°
V3h19 = 3.384416e-04 <8.248857e+01°

```

Figura 10.4 Resultados del flujo armónico de cargas con MATPOWER

10.4. Comparación de resultados

En las siguientes tablas se resumen los diferentes valores obtenidos en el flujo armónico de cargas mediante el método de la penetración armónica con las herramientas de cálculo utilizadas:

| FLFm | MATLAB | MATPOWER |
|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| \underline{V}_{12} (p.u.) | 0.999823667703∠-0.173909371402 ° | 0.999823709191∠-0.173909602875 ° |
| \underline{V}_{13} (p.u.) | 1.000033672432∠-0.110834585411 ° | 1.000033693176∠-0.110834702942 ° |
| t_{13} (s) | -3.002143526442e-04 | -3.002143461148427e-04 |
| t_{23} (s) | 0.007935595170873 | 0.007935595177402 |

Tabla 19 Resultados de la etapa de flujo de cargas fundamental modificado (FLFm)

| VN | MATLAB | MATPOWER |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| $\underline{V}_{11}^{(3)}$ (p.u.) | 2.241781e-03 ∠-3.131851e+01° | 2.241782e-03 ∠-3.131851e+01° |
| $\underline{V}_{11}^{(5)}$ (p.u.) | 3.631882e-03 ∠8.955692e+00° | 3.631890e-03 ∠8.955689e+00° |
| $\underline{V}_{11}^{(7)}$ (p.u.) | 4.931039e-03 ∠4.885250e+01° | 4.931064e-03 ∠4.885250e+01° |
| $\underline{V}_{11}^{(9)}$ (p.u.) | 6.265657e-03 ∠8.843812e+01° | 6.265726e-03 ∠8.843811e+01° |
| $\underline{V}_{11}^{(11)}$ (p.u.) | 8.204463e-03 ∠1.275512e+02° | 8.204671e-03 ∠1.275511e+02° |
| $\underline{V}_{11}^{(13)}$ (p.u.) | 1.484137e-02 ∠1.653033e+02° | 1.484266e-02 ∠1.653031e+02° |
| $\underline{V}_{11}^{(15)}$ (p.u.) | 1.803088e-02 ∠2.882751e+01° | 1.802677e-02 ∠2.882674e+01° |
| $\underline{V}_{11}^{(17)}$ (p.u.) | 2.230111e-03 ∠6.135102e+01° | 2.229942e-03 ∠6.135097e+01° |
| $\underline{V}_{11}^{(19)}$ (p.u.) | 3.679960e-04 ∠8.210026e+01° | 3.679750e-04 ∠8.210025e+01° |
| $\underline{V}_{12}^{(3)}$ (p.u.) | 3.099443e-03 ∠-3.165262e+01° | 3.099446e-03 ∠-3.165262e+01° |
| $\underline{V}_{12}^{(5)}$ (p.u.) | 5.104984e-03 ∠8.730864e+00° | 5.104998e-03 ∠8.730860e+00° |
| $\underline{V}_{12}^{(7)}$ (p.u.) | 7.111508e-03 ∠4.866823e+01° | 7.111551e-03 ∠4.866822e+01° |
| $\underline{V}_{12}^{(9)}$ (p.u.) | 9.362256e-03 ∠8.826936e+01° | 9.362376e-03 ∠8.826935e+01° |
| $\underline{V}_{12}^{(11)}$ (p.u.) | 1.283896e-02 ∠1.273851e+02° | 1.283932e-02 ∠1.273850e+02° |

| | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| \underline{V}^{13}_2 (p.u.) | 2.462352e-02 \angle 1.651311e+02° | 2.462577e-02 \angle 1.651309e+02° |
| \underline{V}^{15}_2 (p.u.) | 3.217822e-02 \angle 2.864190e+01° | 3.217107e-02 \angle 2.864113e+01° |
| \underline{V}^{17}_2 (p.u.) | 4.356946e-03 \angle 6.114395e+01° | 4.356652e-03 \angle 6.114390e+01° |
| \underline{V}^{19}_2 (p.u.) | 8.048268e-04 \angle 8.186149e+01° | 4.356652e-03 \angle 6.114390e+01° |
| \underline{V}^3_3 (p.u.) | 3.892383e-03 \angle -3.166729e+01° | 3.892386e-03 \angle -3.166729e+01° |
| \underline{V}^5_3 (p.u.) | 6.219602e-03 \angle 8.766501e+00° | 6.219613e-03 \angle 8.766498e+00° |
| \underline{V}^7_3 (p.u.) | 8.259722e-03 \angle 4.873862e+01° | 8.259757e-03 \angle 4.873862e+01° |
| \underline{V}^9_3 (p.u.) | 1.016245e-02 \angle 8.837508e+01° | 1.016255e-02 \angle 8.837507e+01° |
| \underline{V}^{11}_3 (p.u.) | 1.271631e-02 \angle 1.275323e+02° | 1.271660e-02 \angle 1.275322e+02° |
| \underline{V}^{13}_3 (p.u.) | 2.158058e-02 \angle 1.653318e+02° | 2.158235e-02 \angle 1.653316e+02° |
| \underline{V}^{15}_3 (p.u.) | 2.392177e-02 \angle 2.891828e+01° | 2.391613e-02 \angle 2.891751e+01° |
| \underline{V}^{17}_3 (p.u.) | 2.576917e-03 \angle 6.154077e+01° | 2.576684e-03 \angle 6.154074e+01° |
| \underline{V}^{19}_3 (p.u.) | 3.384706e-04 \angle 8.248855e+01° | 3.384416e-04 \angle 8.248857e+01° |

Tabla 20 Resultados de la etapa del método de nudos (VN)

Tras haber realizado la simulación del flujo armónico de cargas mediante el método *HP* con las diferentes herramientas de cálculo, podemos fijarnos en las pocas diferencias en los resultados entre ambos programas. Como en el caso anterior, la diferencia más notable está en la comodidad de llegar al resultado con MATPOWER, con la diferencia existente con MATLAB.

Primero se hizo la programación en MATLAB. Mediante la estructura del método de la penetración armónica, que se divide en la parte de *FLFm* y *VN*. Una vez tenemos estos dos programas con los datos necesarios, se realizan más ficheros para adecuar y resolver cada uno de ellos, así como establecer los tiempos de conmutación iniciales, resolver el flujo de cargas fundamental modificado y resolver la descomposición armónica. Tras resolver este caso mediante MATLAB, se reciclan los mismos ficheros añadiendo el fichero con la estructura de MATPOWER y añadir al resto de ficheros, funciones propias de MATPOWER para facilitar el cálculo con las matrices para cada armónico.

Con este caso, se implementa el primer caso de flujo armónico de cargas en la extensión de MATPOWER. Con este, se pretende dar entrada a más casos con este método, cambiando el fichero *case1_HP*, así como adecuando los ficheros *bus_HP_VN_1_19_M* y *bus_HP_FLFm_VN_M* llamando al fichero del caso correspondiente. También se pretende dar entrada a más métodos de cálculo de flujos armónicos de cargas.



11. Análisis de impacto ambiental

En este apartado se analizará el impacto ambiental del proyecto desarrollado. Este es un proyecto teórico e informático, es decir, no se hace ninguna implementación física. Por lo tanto, este análisis no refleja ningún vertido contaminante relacionado con la creación o fabricación derivado con el objetivo del trabajo. No obstante, se analizan los residuos que se han producido con la elaboración del trabajo en dos apartados diferenciados:

- Residuos informáticos, donde se engloban los materiales utilizados en relación a equipos informáticos (fotocopiadora, cartuchos de tinta, tóner de impresora, ...).
- Residuos de material de oficina, donde se engloban los materiales reciclables utilizados con relación a los materiales de oficina de papel (borradores, documentos, fotocopias, ...), ya que los elementos de mayor dificultad reciclable (fundas de plástico o blíster, bolígrafos, ...) se consideran despreciables por su valor ínfimo de impacto ambiental.

También se analiza el consumo eléctrico utilizado durante la realización de este trabajo. Este apartado no pretende hacer un impacto de las fuentes de generación eléctrica y su impacto al medio ambiente, pero sí un detalle del consumo eléctrico utilizado en el proyecto que engloba tanto el consumo de equipos informáticos como iluminación o clima.

En la siguiente tabla se muestra la cantidad aproximada de los residuos y consumo eléctrico dividido en las diferentes fases del trabajo, así como el tratamiento de dicho residuo:

| Fase del trabajo | Residuos informáticos | Residuos de oficina (papel) | Consumo eléctrico (kW) |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|
| Recolección de información | 400 gr | 100 hojas | 40 |
| Estudio teórico | Insignificante | Insignificante | 40 |
| Implementación de programación | Insignificante | Insignificante | 120 |
| Redacción del proyecto | 1500 gr | 250 hojas | 130 |
| Preparación de la defensa | Insignificante | Insignificante | 50 |
| Tratamiento | Reciclable | Reciclable | --- |

Tabla 21 Análisis de impacto ambiental y tratamiento de los residuos del proyecto

Los residuos generados en la realización del proyecto son reciclados en los puntos habilitados para disminuir su impacto ambiental. Se ha apostado por el uso de equipos informáticos frente a un uso excesivo de papel tanto en la realización del proyecto como en su entrega y presentación, utilizando en todo caso papel reciclado.

12. Presupuesto

En este apartado se realiza un análisis económico del proyecto realizado. Dicho análisis se divide en dos grupos, el coste de recursos humanos y el coste de recursos materiales.

En la Tabla 22 se resume la cantidad de horas para cada fase del proyecto, junto a un coste por horas y el coste total de este apartado:

| Fase del trabajo | Cantidad (horas) | Coste unitario (€/horas) | Coste total (€) |
|--------------------------------|------------------|--------------------------|-------------------|
| Recolección de información | 35 | 14 | 490,00 |
| Estudio teórico | 60 | 14 | 1.050,00 |
| Implementación de programación | 300 | 14 | 4.200,00 |
| Redacción del proyecto | 180 | 14 | 2.520,00 |
| Preparación de la defensa | | 14 | 560,00 |
| Total | | | 8.820,00 € |

Tabla 22 Costes de los recursos humanos del proyecto

En la realización del proyecto, se han usado una serie de programas, equipos informáticos y materiales que conllevan un coste resumido en la Tabla 23:

| Elemento | Coste (€) |
|--|-------------------|
| MATLAB R2018a and Simulink Student Suite | 69,00 |
| Microsoft Office 365 ProPlus | 230,40 |
| Equipos informáticos | 350,00 |
| Material de oficina | 100,00 |
| Consumo eléctrico | 300,00 |
| Total | 1.049,40 € |

Tabla 23 Costes de los materiales utilizados en el trabajo

En la siguiente tabla se muestra los desgloses del coste total del proyecto, teniendo en cuenta los dos apartados y el impuesto sobre el valor añadido:

| | |
|---------------------------------|--------------------|
| Coste de los recursos humanos | 8.820,00 € |
| Coste de los materiales | 1.049,40 € |
| Coste total | 9.869,40 € |
| IVA (21%) | 2.072,57 € |
| Coste total del proyecto | 11.941,97 € |

Tabla 24 Coste total del proyecto

El presupuesto total del proyecto es:

11.941,97 €

ONCE MIL NOVECIENTOS CUARENTA Y UN EUROS CON NOVENTA Y SIETE CÉNTIMOS DE EURO

13. Conclusiones

La implementación de un caso de estudio de flujo de cargas fundamental permite, por una parte, familiarizarnos con la extensión MATPOWER (cómo funciona, cómo es la entrada de datos, qué metodología permite y usa, ...) y por otra, compararla con las otras herramientas de cálculo. Este ejercicio permite ver las ventajas de esta herramienta y la facilidad de resolver diferentes casos de forma más directa y cómoda obteniendo unos buenos resultados.

Tras resolver y estudiar un caso de flujo de cargas fundamental, se procede al estudio de los fundamentos teóricos e indicadores de la distorsión armónica en señales periódicas y al estudio de una fuente de alimentación monofásica. Este estudio nos introduce a la problemática de las cargas no lineales y se presentan los conocimientos teóricos para un caso específico.

Con unos fundamentos teóricos base, se procede al estudio del flujo armónico de cargas mediante el método de la penetración armónica. Mediante este método, se resuelve un caso de estudio específico en MATLAB y a continuación, se implementa y se adecua a MATPOWER los ficheros necesarios para introducir a esta herramienta los flujos armónicos de cargas.

Introduciendo a MATPOWER un caso de estudio de un flujo armónico de cargas mediante el método de la penetración armónica, se da paso a la implementación de diferentes casos de estudio. Introducir diferentes métodos, como el método de flujo de cargas armónico simplificado (*SHLF, Simplified Harmonic Load Flow*) o utilizando la formulación del flujo armónico de cargas completo (*CHLF, Complete Harmonic Load Flow*). También se puede sustituir la función “*fsolve*” utilizada en este trabajo y utilizar un método numérico diferente para resolver el sistema de ecuaciones no lineales. Así como implementar diferentes cargas no lineales e incluso realizar un estudio para una red general, que sirva para todo tipo de redes.



14. Bibliografía

- [1] Boix, O., 1996. “Estudio y modelización en r.p. de cargas no lineales para el análisis armónico de redes eléctricas”. Tesis, UPC, Barcelona.
- [2] Córcoles López, F., Sáinz Sopera, L. y Pedra Durán, J., 2011. “Perturbaciones periódicas”. ETSEIB, UPC, Barcelona.
- [3] Herraiz Jaramillo, S., 2002. “Aportaciones al estudio del flujo armónico de cargas”. Tesis, UPC, Barcelona.
- [4] InterPSS Community. [en línea]. [Consulta: 22 mayo 2019]. Disponible en: <http://www.interpss.org/>.
- [5] López Melendo, J., 2018. “Calidad de potencia: armónicos y factor de potencia”. Primera edición. S.I.: MARCOMBO, S.A. ISBN 978-84-267-2571-4.
- [6] MATLAB & Simulink. [en línea], [Consulta: 22 mayo 2019]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [7] Mesas, J.J., 2017. “Estudio del flujo de cargas”, Diapositivas Tema 1, Asignatura de Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia (ASEP), UPC, Barcelona.
- [8] Mesas, J.J., 2009. “Estudio y caracterización de cargas no lineales”. S.I.: ETSEIB, UPC, Barcelona.
- [9] Mesas, J.J., Sainz, L. y Molina, J., 2011. “Parameter estimation procedure for models of single-phase uncontrolled rectifiers”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 3, pp. 1911-1919.
- [10] Rashid, A., Mesas, J.J. y Sainz, L., pendiente de aceptación. “An improved harmonic load flow formulation.” Electric Power Components and Systems.
- [11] Suárez Guerrero, F., 2015. “Evaluación del programa de código abierto MATPOWER para estudios de flujo de potencia con armónicos”. Trabajo final de Grado, UCV, Caracas.
- [12] Wood, A.J., Wollenberg, B.F. y Sheble, G.B., 2011. “Power Generation, Operation, and Control”. Tercera edición. S.I.: s.n. ISBN 9780471790556.
- [13] Zimmerman, R.D. y Murillo-Sánchez, C.E., 2018. “MATPOWER User’s Manual Version 7.0b1”. [en línea]. S.I.: [Consulta: 22 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.pserc.cornell.edu/matpower/MATPOWER-manual.pdf>.
- [14] Zimmerman, R.D; Murillo-Sánchez, C.E.& others, 2019. “MATPOWER. Free, open-source Electric Power System Simulation and Optimization Tools for MATLAB and Octave”. [en línea]. S.I.: [Consulta: 22 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.pserc.cornell.edu/matpower/MATPOWER-manual.pdf>.